

# 山地城市暴雨径流污染特性及控制对策

王书敏<sup>1,2</sup> 何强<sup>1</sup> 艾海男<sup>1</sup> 潘伟亮<sup>1</sup> 智悦<sup>1</sup> 王静<sup>1</sup>

(1. 重庆大学三峡库区生态环境教育部重点实验室, 重庆 400045; 2. 重庆文理学院材料与化工学院, 重庆 402168)

**摘要** 为了解山城重庆的暴雨径流污染特性, 充实国内仍然薄弱的基础资料, 对4种用地类型的4场暴雨进行了监测, 测试指标包括 TSS、COD、TP、TN 和  $\text{NH}_3\text{-N}$ 。结果表明, 对于坡度 2.5% 的交通干道和坡度 30% 的校园人行道, 从污染物浓度降幅的角度考虑初期径流的控制量应分别为 2~3 mm 和 1.8 mm。随降雨时间的延长, 路面污染物浓度迅速降低, 坡度越大, 降低速率越快。对于平均浓度, 校园屋顶和草坪的各污染物浓度均达到地表水环境质量 V 类标准(总氮和氨氮除外)。交通干道和校园人行道的总磷平均浓度也满足地表水环境质量 V 类标准, 但 2 种下垫面的 COD、TN 和氨氮平均浓度分别超出地表水环境质量 V 类标准的 2~8 倍、1.9~3.1 倍和 1.9~4.3 倍。对于交通干道, 场次降雨径流的总氮、总磷和氨氮平均浓度与初期浓度的比值和污染物浓度 20 min 降幅接近(分别为 0.5~0.53 和 50%~55%) 接近, 而 COD 和 TSS 平均浓度与初期浓度的比值和污染物浓度 20 min 降幅相近(分别为 0.35~0.37 和 78%~84%)。对于校园人行道, 污染物浓度 20 min 降幅均达到 90% 以上(90%~96%)。场次降雨径流的总氮、总磷、氨氮、COD 和 TSS 的平均浓度与初期浓度的比值接近(0.3~0.4)。研究结果为山地城市暴雨径流的污染控制提供了参考。

**关键词** 山地城市 暴雨径流 水质 特性 控制

中图分类号 X506 文献标识码 A 文章编号 1673-9108(2012)05-1445-06

## Characteristics and control of urban rainfall-runoff in mountainous city

Wang Shumin<sup>1,2</sup> He Qiang<sup>1</sup> Ai Hainan<sup>1</sup> Pan Weiliang<sup>1</sup> Zhi Yue<sup>1</sup> Wang Jing<sup>1</sup>

(1. Key Laboratory of Eco-Environment of Three Gorges Region of Ministry of Education, Chongqing University, Chongqing 400045, China;

2. College of Material and Chemical Engineering, Chongqing University of Arts and Science, Chongqing 402168, China)

**Abstract** In order to understand pollutant characteristics of urban storm runoff in mountainous city, and enrich basic data which was still weak in our country, four storm events were investigated and samples from four kinds of land surfaces were analyzed. The concentrations of TSS, COD, TP, TN and  $\text{NH}_3\text{-N}$  were monitored. The results showed that the early 2~3 mm and 1.8 mm runoff should be controlled for traffic road with slope 2.5% and campus sidewalk with slope 30% correspondingly from the point of view of pollutant concentrations reduction. Concentrations of pollutants from road and campus sidewalk reduced quickly with the prolongation of rainfall time. The steeper the slope was, the faster the pollutant concentration reduced. With regard to the average concentration, all pollutants from campus roof and lawn met class V surface water standard except TN and  $\text{NH}_3\text{-N}$ , which was the same with TP concentration from traffic road and campus pavement. However, concentrations of COD, TN and  $\text{NH}_3\text{-N}$  from traffic road and campus pavement were 2~8, 1.9~3.1 and 1.9~4.3 times higher than class V surface water standard respectively. As regard to runoff from traffic road, the ratio of average concentration to initial consistence of TN, TP and  $\text{NH}_3\text{-N}$  and the reduction rate of pollutant concentrations after runoff occurred 20 minutes during a single rainfall event were similar to each other (i.e., 0.5~0.53 and 50%~55%), while the same property for COD and TSS were 0.35~0.37 and 78%~84%, respectively. The rate of concentration decrease for every pollutant monitored when the runoff from campus sidewalk had started for 20 minutes could all exceed 90% (i.e., 90%~96%) and the ratio of average concentration to initial consistence of all pollutants investigated was close to each other (i.e., 0.3~0.4). A reference of runoff pollution control in mountainous city was given in this study.

**Key words** mountainous city; rainfall-runoff; water quality; characteristic; control

快速城市化造成了流域不透水面积的迅速增加, 由此引起的城市水环境恶化已引起广泛关注<sup>[1]</sup>。国内一些城市先后开展了暴雨径流污染特性的研究, 如郑州<sup>[2]</sup>、上海<sup>[3]</sup>、武汉<sup>[4]</sup>、广州<sup>[5]</sup>、厦门<sup>[6]</sup>和西安<sup>[7]</sup>等, 但大部分都属于平原城市。各种

基金项目: 国家“水体污染控制与治理”科技重大专项(2008ZX07315-001); 重庆市科委项目(CSTC2010BB1351); 重庆市教委项目(KJ111204); 重庆大学研究生科技创新基金资助项目(CDJXS11210011)

收稿日期: 2010-11-29; 修订日期: 2011-01-17

作者简介: 王书敏(1980~) 男, 博士研究生, 讲师, 主要从事城市非点源污染监控研究工作。E-mail: wangshumin5103@sina.com

用地类型的径流水质调查是城市面源污染负荷估算、模拟的关键和基础,不同区域环境背景不同,污染物分布特性也不同,尽管国内已进行了部分工作,但基础研究仍然薄弱。山地城市地形复杂,暴雨径流峰短流急,在山地城市开展城市暴雨径流水质特性的研究对于充实城市面源污染研究的基础数据有重要意义。

本研究选取山城重庆的交通干道、校园人行道、校园屋面和校园草坪进行降雨径流水质特性研究,以期累积城市面源污染调查的基础资料,为城市径流污染物控制和管理决策提供依据。

## 1 材料与方法

重庆地处四川盆地两江交汇处,气候与其他城市明显不同,夏季酷暑,冬季湿寒,降雨主要集中在夏秋季节,且峰值降雨强度大,时间短,而秋末和冬天的降雨强度小,但持续时间长。本研究共进行了4场降雨的测试工作,监测时间集中于夏秋季节,以求捕捉山城重庆的代表性降雨,降雨情况见表1。2009-08-10和2009-08-17的降雨体现了重庆夏季降雨峰值强度大、持续时间短的特点,进行了交通干道地表径流的水质监测;2010-06-19的降雨进行了校园人行道和校园混凝土屋面的径流水质监测;2010-09-06的降雨属于秋季中下旬降雨,峰值降雨强度小、时间长,采集了草坪水样测试。

路面径流采样自产流起30 min内,每隔5 min采1个样,30~60 min时段内,每隔10 min采1个样;60~120 min时段内,每隔30 min采1个样,场次降雨采集水样7~10个。混凝土屋面的暴雨径流完全收集于容器中,混匀水样作为场次降雨的采集水样。草坪径流系数小,产流量小,采集了1个水样。分析项目包括COD、TSS、TN、TP和 $\text{NH}_3\text{-N}$ ,样品采集、保存及测试方法皆用国家标准方法<sup>[8]</sup>。

交通干道取样点位于重庆市渝培路与杨公桥交接处,路面汇水区用地类型为商住混合区,道路覆盖材料为沥青,坡度约2.5%,为双向6车道,单向机动车道路面宽6 m,汇水区面积约2 000  $\text{m}^2$ ,昼间平均交通量为1 800辆/h,清扫频率为1次/d;校园人行道取样点位于重庆大学B区校园内,覆盖材料为人行道砖,坡度30%,汇水面积约100  $\text{m}^2$ ;混凝土屋面取样点位于重庆大学B区实验楼,为人工分割出的封闭区域,面积12  $\text{m}^2$ ;草坪取样点位于重庆大学虎溪校区,坡度3%~5%,汇水面积约40  $\text{m}^2$ 。采样

点分布情况如图1所示。



图1 采样点分布图

Fig. 1 Map of sampling locations

表1 降雨事件统计

Table 1 Statistic of monitored rainfall events

降雨日期	降雨量 (mm)	降雨持续 时间 (min)	平均降雨 强度 (mm/h)	峰值降雨 强度 (mm/h)	降雨前 晴天 时间(d)
2009-08-10	13.6	60	13.6	39.6	1
2009-08-17	6.6	30	12.6	42	7
2010-06-19	12.8	90	8.5	21.6	7
2010-09-06	6.4	240	1.6	7.2	5

## 2 结果与讨论

### 2.1 不同下垫面 TSS 和 COD 分布特性

图2为4种下垫面暴雨径流中TSS和COD的历时分布特性。随径流时间的延长,交通干道和校园人行道径流的TSS和COD浓度迅速降低,前20 min,TSS和COD的降幅可分别达到80%~90%和70%~90%,充分体现了山地城市地面坡度大,初期冲刷效应明显的特点。2009年8月10—17日的监测结果表明,降雨前晴天时间间隔对初期径流的污染物浓度有显著影响,对于交通干道的初期径流,降雨间隔7 d的COD浓度(993 mg/L)是降雨间隔1 d浓度(493 mg/L)的2倍,TSS的浓度差异也达到了2.2倍。对于TSS,交通干道两场暴雨径流的平均浓度分别为210 mg/L和448 mg/L,分别为初期径流浓度的0.35倍和0.34倍,TSS平均浓度与初期径流TSS浓度的关系两场暴雨接近;校园人行道暴雨径流的TSS平均浓度为47 mg/L,是其初期径流TSS浓度的0.43倍;而校园屋顶的TSS平均浓度只有30 mg/L。对于COD,交通干道暴雨径流的平均浓度为200~330 mg/L,是地表水环境质量V类标准

(40 mg/L) 的 5~8 倍, 初期径流浓度的 0.33~0.41 倍; 校园人行道径流的 COD 平均浓度为 92 mg/L, 超出地表水环境质量 V 类标准(40 mg/L) 2 倍多, 是初期径流浓度的 0.35 倍; 校园屋顶和草坪径流的 COD 平均浓度分别为 35 mg/L 和 16 mg/L, 其中草坪径流的 COD 平均浓度达到了地表水环境质量 III 类标准(20 mg/L)。各种下垫面暴雨径流污染物浓度的差异是由降雨前期污染物的累积量决定的, 这与不同下垫面的环境背景密切相关。大气沉降是草坪和校园屋顶污染物累积的主要来源, 而交通干道和校园人行道的污染物累积还受交通负荷、街道清扫等因素的影响, 因此, 在场次降雨中, 各种下垫面表现出不同的排污强度。

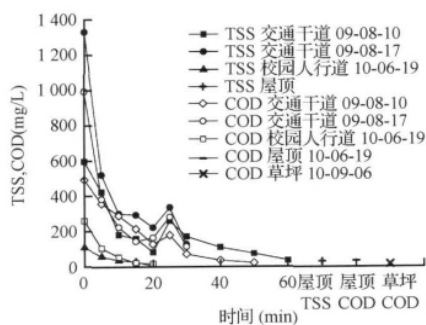


图2 不同用地类型暴雨径流的 TSS 和 COD 特性  
Fig. 2 Characteristics of TSS & COD in rainfall-runoff events from different urban surfaces

据报道, 北京市初期路面径流中悬浮物和 COD 浓度分别为 1 934 mg/L 和 1 220 mg/L<sup>[9]</sup>; 西安市初期路面径流中悬浮物和 COD 浓度也分别达到了 1 502 mg/L 和 1 230 mg/L<sup>[7]</sup>; 广州市 7 场次的 COD 和 SS 的 EMCs 分别为 373 mg/L 和 439 mg/L<sup>[10]</sup>, 充分体现了路面径流污染的区域差异, 应当针对不同类型城市的特点, 进一步丰富基础数据, 为暴雨径流污染特性的深入研究奠定基础。

## 2.2 各下垫面的 TN 浓度特性

图 3 是 4 种下垫面的总氮浓度分布特性。对于全场降雨的总氮平均浓度, 草坪径流总氮浓度为 2 mg/L, 满足地表水环境质量 V 类标准(2 mg/L), 混凝土屋顶径流平均浓度为 3.3 mg/L, 是地表水环境质量 V 类标准(2 mg/L) 的 1.65 倍。校园人行道径流的平均浓度为 5.5 mg/L, 是地表水环境质量 V 类标准(2 mg/L) 的 2.75 倍, 是初期径流浓度的 0.35 倍。交通干道径流平均浓度 3.7~6.2 mg/L,

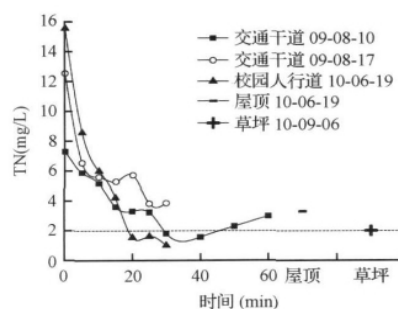


图3 不同用地类型暴雨径流的 TN 特性  
Fig. 3 Characteristics of TN in rainfall-runoff events from different urban surfaces

是初期径流浓度的 0.51~0.5 倍, 两场降雨接近, 这与 TSS 与 COD 表现出的性质相似。径流产生 20 min 后, 校园人行道径流的总氮浓度降到了 1.5 mg/L, 满足地表水环境质量 V 类标准(2 mg/L), 降幅达 90%; 交通干道产流 20 min 后, 总氮浓度降到了 3.3~5.7 mg/L, 是地表水环境质量 V 类标准(2 mg/L) 的 1.7~2.9 倍, 两场降雨总氮浓度的 20 min 降幅相近(54%~57%), 这说明坡度对污染物浓度的降低速率影响显著, 坡度越大, 浓度降低速率越快, 而在同一坡度下, 各场次降雨的污染物浓度变化速率接近。交通干道后期尾流中总氮浓度有所升高, 这应该是降雨强度和降雨期间排污综合作用的结果。降雨初期, 降雨以冲刷作用为主, 降雨强度越大则冲刷动能越大, 径流中污染物浓度越大; 随着降雨历时增加, 稀释作用转为主导, 径流污染物浓度下降, 在径流末期, 交通干道排污强度不变而径流量减少, 导致尾流中污染物浓度增加。校园人行道坡度较大, 径流冲刷强度大, 这可能也是校园人行道初期总氮浓度高且污染物浓度降低速率快的原因之一。

## 2.3 各下垫面的 NH<sub>3</sub>-N 浓度特性

图 4 是 4 种下垫面的氨氮浓度分布特性。校园屋顶和草坪径流的氨氮浓度分别为 0.34 mg/L 和 0.65 mg/L, 满足了地表水环境质量 III 类标准(1 mg/L)。径流产生 20 min 后, 校园人行道径流的氨氮浓度降到了 1 mg/L, 满足地表水环境质量 III 类标准(1 mg/L), 降幅达 90%; 交通干道产流 20 min 后, 氨氮浓度降到了 2.1~3.6 mg/L, 是地表水环境质量 V 类标准(2 mg/L) 的 1.0~1.8 倍, 两场降雨氨氮浓度的 20 min 降幅相近(50%~60%), 与总氮浓度变化规律相似, 坡度对地表径流氨氮浓度的降低

速率有显著影响。对于全场降雨的氨氮平均浓度,校园人行道径流的平均浓度为 3.7 mg/L,是地表水环境质量 V 类标准(2 mg/L)的 1.85 倍,是初期径流浓度的 0.36 倍;交通干道径流平均浓度 2.2 ~ 4.3 mg/L,是初期径流浓度的 0.47 ~ 0.55 倍。

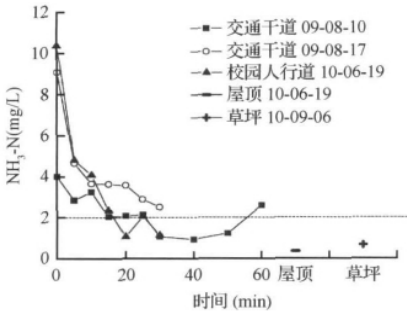


图4 不同用地类型暴雨径流的 NH<sub>3</sub>-N 特性  
Fig. 4 Characteristics of NH<sub>3</sub>-N in rainfall-runoff events from different urban surfaces

2.4 各下垫面的 TP 分布特性

图5是4种下垫面的总磷浓度变化规律。对于初期径流,校园人行道总磷浓度为 0.9 mg/L,是地表水环境质量 V 类标准(0.4 mg/L)的 2.25 倍。交通干道初期径流的总磷浓度为 0.46 ~ 0.55 mg/L,约是地表水环境质量 V 类标准(0.4 mg/L)的 1.1 ~ 1.4 倍。而径流产生 10 min 后,校园人行道的总磷浓度降到了 0.17 mg/L,满足地表水环境质量 III 类标准(0.2 mg/L),降幅达 81%;交通干道产流 10 min 后,总氮浓度降到了 0.2 ~ 0.32 mg/L,降幅为 32% ~ 58%。对于全场降雨的总磷平均浓度,校园人行道为 0.24 mg/L,满足地表水环境质量 V 类标准(0.4 mg/L),交通干道总磷平均浓度为 0.26 ~ 0.28 mg/L,也满足地表水环境质量 V 类标准(0.4 mg/L)。校园屋顶和草坪的总磷平均浓度分别为

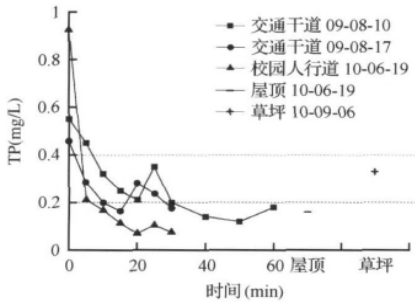


图5 不同用地类型暴雨径流的 TP 特性  
Fig. 5 Characteristics of TP in rainfall-runoff events from different urban surfaces

0.16 mg/L 和 0.33 mg/L,分别满足地表水环境质量 III 类和 V 类标准。与其他污染指标相比,总磷浓度超标率低(相对于地表水环境质量 V 类标准来说),降雨产流 10 min 后,各个下垫面的径流水质都能满足地表水环境质量 V 类标准。

2.5 污染物相关性分析

各污染物之间的皮尔逊相关系数分析如表 2 所示,COD 和 TSS 在 0.01 水平上极显著相关,固态有机物是 COD 的主要来源,TSS 表现为有机物的载体。TN 与 COD 在 0.05 水平上也呈显著相关,而 TP 与 COD 则相关性不强。Kim 等<sup>[11]</sup>分析了南韩大田市降雨径流中各污染物之间的皮尔逊相关系数,TSS 和 TCOD 相关系数达 0.93,郑州市区屋顶和公路暴雨径流的 TSS 和 COD 的相关系数也达到了 0.877 ~ 0.949<sup>[2]</sup>,与本研究结果相似。而 Kim 等<sup>[11]</sup>得出的 TSS 与 TN、TP 相关系数分别为 0.69 和 0.84,呈显著相关关系,这与本研究结果不符,充分体现了暴雨径流水质特性的区域差异。

表2 重庆市各水质组分的皮尔逊系数

Table 2 Pearson coefficients between water quality constituents in Chongqing City, China

	TSS	COD	TN	TP
TSS	1			
COD	0.959 **	1		
TN	0.477 *	0.616 **	1	
TP	0.371	0.539 *	0.807 **	1

\* 在 0.05 水平(双侧)上显著相关;  
\*\* 在 0.01 水平(双侧)上显著相关。

3 山地城市路面雨水径流控制对策分析

3.1 控制初期径流

监测结果表明,交通干道和校园人行道的初期径流污染物浓度较高,是暴雨径流污染控制的重点。首先,确定初期径流的控制量。对于城市大汇水面或较大的管渠系统,一般采用“半英寸”原则,认为初期 12 mm 的径流所含的污染物占全部径流污染物总量的 90% 以上,也有研究认为市区路面初期控制径流量为 6 ~ 8 mm<sup>[12]</sup>;Zhang 等在郑州的研究结果推荐商业区和工业区的初期收集量分别为 5 mm 和 10 mm<sup>[2]</sup>。然而,这些研究均是针对平原城市,山地城市由于路面坡度大,初期径流控制量应有所区别。从本研究结果看,TSS 与 COD 和 TN 相关性显著,而 TP 浓度相对较低,TSS 应当是山地城市路面

径流污染控制的首选指标,图6~图8是交通干道和校园人行道径流的TSS浓度与累积降雨量的关系。由图可知,对于坡度2.5%的交通干道来说,TSS浓度在初期降雨量2~3 mm时降低速率最快,降幅可达69%~77%,之后交通干道的雨天排污与降雨冲刷近似平衡,TSS的降低速率减缓,因此,从污染物浓度降低的角度考虑,交通干道初期径流污染的控制量可选2~3 mm。对于坡度30%的校园人行道,TSS浓度与累积降雨量呈显著负相关,可能是由于降雨期间人行道排污强度骤减的原因,初期累积降雨1.8 mm时,TSS满足城镇污水处理厂污染物三级排放标准(GB18918-2002),因此,从污染物浓度水平上考虑,坡度30%的校园人行道的控制量可确定在1.8 mm。其次,选择合适的初期径流处理措施。滞留沉降系统、生物过滤或渗透系统都有较高的TSS去除率,但由于营养盐的形态转化、生物过滤介质中的物质溶出等原因,对氮磷等营养物质的协同去除效果不稳定,需配合采用其他手段去除<sup>[13]</sup>。

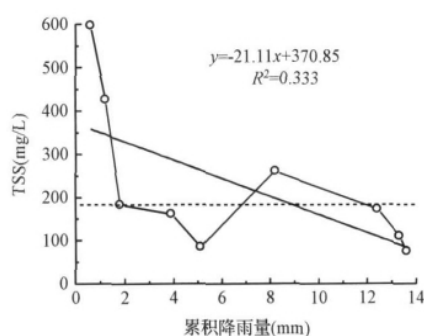


图6 2009-08-10 交通干道 TSS 与累积降雨量关系

Fig. 6 Correlation between TSS from traffic road and accumulative rainfall on 10 August 2009

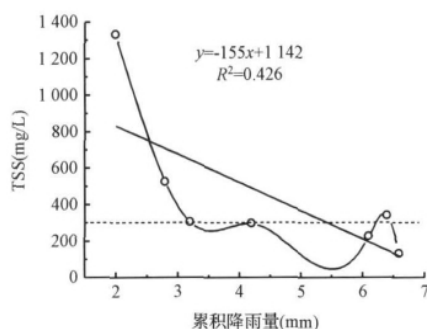


图7 2009-08-17 交通干道 TSS 与累积降雨量关系

Fig. 7 Correlation between TSS from traffic road and accumulative rainfall on 17 August 2009

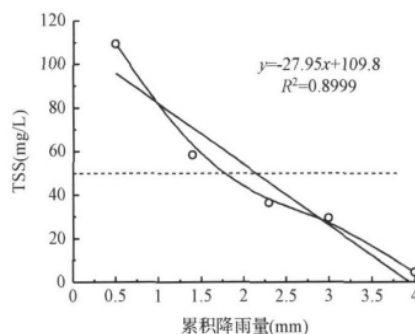


图8 2010-06-19 校园人行道 TSS 与累积降雨量关系

Fig. 8 Correlation between TSS from campus pavement and accumulative rainfall on 19 June 2010

### 3.2 革新城市排水管理理念,建立具备控污与防洪双重功能的现代城市排水系统

目前的城市排水方法仍然是沿用传统的快速收集快速排放的设计理念,导致排水系统初期冲刷效应明显,雨水管中的初期径流水质甚至劣于合流制的雨天溢流水质<sup>[14]</sup>。一些新的 BMPs 的调峰控污效果已初见成效,如渗透排水沟、雨水花园<sup>[15-17]</sup>等,因此,革新城市排水理念,升级现有排水系统的功能,将城市生态景观建设与城市排水设施协同布局,构建城市生态排水系统是控制径流污染的有效途径。

### 3.3 改善城市卫生状况,减少污染物累积

增加清扫频率,扩大城市清扫范围,及时清除堆积的垃圾,是减少城市污染物累积量的重要手段。此外,建设卫生市区环境,减少大气的干湿沉降,也可以减少暴雨径流污染。

## 4 结 论

(1) 路面初期径流污染物浓度较高,随降雨时间的延长,污染物浓度迅速降低,坡度越大,降低速率越快。对于平均浓度,校园屋顶和草坪的各污染物浓度均达到地表水环境质量 V 类标准(总氮和氨氮除外)。交通干道和校园人行道的总磷平均浓度也满足地表水环境质量 V 类标准,但两种下垫面的 COD、TN 和氨氮平均浓度分别超出地表水环境质量 V 类标准的 2~8 倍、1.9~3.1 倍和 1.9~4.3 倍。

(2) 对于交通干道来说,两场降雨总氮、总磷和氨氮的平均浓度与初期浓度的比值接近(0.5~0.6),而 TSS 和 COD 的平均浓度与初期浓度比值差别不大(0.3~0.4);对于交通干道前 20 min 污染物浓度的降幅,TSS 和 COD 比较接近(0.7~0.8),而

总氮和氨氮浓度的降幅相仿(0.5~0.6)。对于单场降雨的校园人行道,TSS、COD、总氮和氨氮的平均浓度与初期浓度的比值非常接近(0.35~0.43),而TSS、COD、总氮和氨氮前20 min的浓度降低幅度相似(0.9~0.96)。

(3) TSS与COD的相关性显著,不仅是主要污染物,也是其他污染物的载体,应作为路面降雨径流污染控制的首要指标。对于坡度2.5%的交通干道和坡度30%的校园人行道,从污染物浓度水平上考虑,建议初期径流的控制量分别为2~3 mm和1.8 mm。革新城市排水理念,将城市排水系统和城市面源污染控制措施结合起来,建立具备排水和控污双重功效的现代城市生态排水系统是控制城市面源污染的根本途径。

## 参考文献

- [1] Wang L. Z., Lyons J., Kanehl P. Impacts of urbanization on stream habitat and fish across multiple spatial scales. *Environmental Management*, **2001**, 28(2): 255-266
- [2] Zhang M. L., Chen H., Wang J. Z., et al. Rainwater utilization and storm pollution control based on urban runoff characterization. *Journal of Environmental Sciences*, **2010**, 22(1): 40-46
- [3] Balloa S., Liu M., Houb L. J., et al. Pollutants in stormwater runoff in Shanghai (China): Implications for management of urban runoff pollution. *Progress in Natural Science*, **2009**, 19(7): 873-880
- [4] 李立青,尹澄清,孔玲莉,等. 2次降雨间隔时间对城市地表径流污染负荷的影响. *环境科学*, **2007**, 28(10): 2287-2292  
Li L. Q., Yin C. Q., Kong L. L., et al. Effect of antecedent dry weather period on urban storm runoff pollution load. *Environmental Science*, **2007**, 28(10): 2287-2292 (in Chinese)
- [5] Gan H. Y., Zhuo M. N., Li D. Q., et al. Quality characterization and impact assessment of highway runoff in urban and rural area of Guangzhou, China. *Environmental Monitoring and Assessment*, **2008**, 140(1-3): 147-159
- [6] Wei Q. S., Zhu G. F., Wu P., et al. Distributions of typical contaminant species in urban short-term storm runoff and their fates during rain events: A case of Xiamen City. *Journal of Environmental Sciences*, **2010**, 22(4): 533-539
- [7] 赵剑强,刘珊,邱立萍,等. 高速公路路面径流水质特性及排污规律. *中国环境科学*, **2001**, 21(5): 445-448  
Zhao J. Q., Liu S., Qiu L. P., et al. The characteristics of expressway runoff quality and pollutants discharge rule. *China Environmental Science*, **2001**, 21(5): 445-448 (in Chinese)
- [8] 国家环境保护总局. 水和废水监测分析方法(第4版). 北京: 中国环境科学出版社 **2002**
- [9] 蒋德明,蒋玮. 国内外城市雨水径流水质的研究. *物探与化探*, **2008**, 32(2): 417-420  
Jiang D. M., Jiang W. A study of water quality of rainfall runoff in cities of China and abroad. *Geophysical and Geochemical Exploration*, **2008**, 32(2): 417-420 (in Chinese)
- [10] 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. *生态环境*, **2006**, 15(5): 969-973  
Gan H. Y., Zhuo M. N., Li D. Q., et al. Water quality characteristics of road runoff from urban area of Guangzhou. *Ecology and Environment*, **2006**, 15(5): 969-973 (in Chinese)
- [11] Kim G., Yur J., Kim J. Diffuse pollution loading from urban stormwater runoff in Daejeon city, Korea. *Journal of Environmental Management*, **2007**, 85(1): 9-16
- [12] 车伍,张炜,李俊奇,等. 城市雨水径流污染的初期弃流控制. *中国给水排水*, **2007**, 23(6): 1-5  
Che W., Zhang W., Li J. Q., et al. Initial split-flow control of urban rainwater runoff pollution. *China Water & Wastewater*, **2007**, 23(6): 1-5 (in Chinese)
- [13] Hatt B. E., Fletcher T. D., Deletic A. Hydrologic and pollutant removal performance of stormwater biofiltration systems at the field scale. *Journal of Hydrology*, **2009**, 365(3-4): 310-321
- [14] 刘翠云,车伍,董朝阳. 分流制雨水与合流制溢流水质的比较. *给水排水*, **2007**, 33(4): 51-55  
Liu C. Y., Che W., Dong Z. Y. Sewer water quality comparison of separate discharge and combined overflow. *Water & Wastewater Engineering*, **2007**, 33(4): 51-55 (in Chinese)
- [15] Memon F. A., Butler D. Assessment of gully pot management strategies for runoff quality control using a dynamic model. *The Science of the Total Environment*, **2002**, 295(1-3): 115-129
- [16] Davis A. P., Hunt W. F., Traver R. G., et al. Bioretention technology: Overview of current practice and future needs. *Journal of Environmental Engineering*, **2009**, 135(3): 109-117
- [17] Poirier A. R., Champagne P., Filion Y. Review of bioretention system research and design: Past, present, and future. *Journal of Environmental Engineering*, **2010**, 136(9): 878-889