

常州市不同下垫面污染物冲刷特征

张香丽^{1,2} 赵志杰^{1,2,†} 秦华鹏² 江燕^{1,2}

1. 北京大学环境科学与工程学院, 北京 100871; 2. 北京大学深圳研究生院环境与能源学院, 城市人居环境科学与技术重点实验室, 深圳 518055; † 通信作者, E-mail: zhaozhijie@pku.edu.cn

摘要 为研究城市硬化下垫面降雨径流对污染物的冲刷特征, 选取常州市5类典型硬化下垫面, 采样监测2015年3—8月期间6场降雨径流及污染物浓度变化过程, 得到以下结果。1) 地面径流污染物EMC均值高于屋面径流; 地面径流SS和COD浓度超过水质标准V类1.34倍和2.59倍; 屋面径流COD和TN浓度超过水质标准V类1.8倍和2.6倍。屋面径流中溶解态COD和TN分别占全量的72.78%和57.99%; 地面径流溶解态TN占全量的61.59%。2) 径流初期污染严重, 随着降雨过程逐渐降低, 最终趋于稳定。各下垫面污染物初期浓度从大到小依次为水泥地面、沥青地面、铺装地面、平屋面、斜屋面。冲刷过程中, 随雨强增大, 各下垫面污染物浓度升高, 呈波动式变化。各下垫面污染物均有冲刷初期效应, 下垫面初期冲刷强度从强到弱依次为平屋面、斜屋面、水泥地面和沥青地面。前期降雨强度越大, 污染物初期浓度越大, 初期效应越显著。降雨强度为大雨时, SS浓度呈指数型衰减。降雨强度为小雨时, SS浓度先稳定, 随着降雨变密集开始逐渐减小。降雨强度为暴雨, 但降雨过程集中在中后期时, SS浓度呈先增大随后减小的趋势变化。3) 指数冲刷模型对屋面和水泥地面污染物径流冲刷模拟效果较好, 斜屋面、平屋面、水泥地面全量污染物冲刷系数分别为0.871, 0.765和0.025 mm⁻¹, 屋面冲刷强度远大于地面。斜屋面溶解态COD与颗粒态COD冲刷系数相近, 冲刷强度大。平屋面、水泥地面的颗粒态COD冲刷系数均大于溶解态COD, 颗粒态COD冲刷强度更大。

关键词 下垫面; 降雨冲刷; 径流; 冲刷系数

中图分类号 X52

Characteristics of Pollutants Flush on Different Types of Underlying Surface in Changzhou

ZHANG Xiangli^{1,2}, ZHAO Zhijie^{1,2,†}, QIN Huapeng², JIANG Yan^{1,2}

1. College of Environmental Sciences and Engineering, Peking University, Beijing 100871; 2. Key Laboratory for Urban Habitat Environmental Science and Technology, School of Environment and Energy, Peking University Shenzhen Graduate School, Shenzhen 518055; † Corresponding author, E-mail: zhaozhijie@pku.edu.cn

Abstract The purpose of the study is flush characteristics of urban runoff pollutant on different underlying surface. Select 5 typical hardened surfaces in Changzhou City and monitor the change process of rainfall runoff pollutant from March to August in 2015. The results showed that event mean concentrations (EMC) of pollutants in road runoff were higher than that of roof runoff. For road runoff, SS concentration was higher than the water quality standards by 1.34 times; COD concentration was higher than the water quality standards by 2.59 times. For the roof runoff, COD concentration was higher than the water quality standards by 1.8 times; and TN concentration was higher than the water quality standards by 2.6 times. For the roof runoff, the dissolved-bound fraction was 72.78% for COD, 57.99% for TN. For road runoff, the dissolved-bound fraction was 61.59% for TN. The pollutant concentrations were commonly higher at the initial stage, while decreased with prolonging of the rainfall time and

国家水体污染控制与治理科技重大专项(2013ZX07501005)资助

收稿日期: 2017-03-02; 修回日期: 2017-03-29; 网络出版日期: 2018-05-10

gradually became stable at the later stage. The initial concentrations of pollutants from the underlying surface were as follows: concrete ground, asphalt ground, paved ground, flat roof and slope roof. During the rain flush, the concentration of pollutants on the underlying surface increases with the increase of the intensity of the rain which was fluctuated. The intensity of the first flush intensity varied by surface and was most intense for the flat roof, followed by the slope roof, then the asphalt road and finally the concrete road. Rainfall in pre-period was intensive and pollutant concentration was exponentially attenuated. When rainfall changes smoothly, the concentration of pollutants was stable firstly and then attenuation. When the rainfall was sparse in pre-period and intensive in the late-period, the curves of pollutant change type was multi-peak type. The index flush model had good effect to pollutant runoff simulation, the flush coefficients of COD on the slope roof, flat roof, and concrete road were 0.871, 0.765, and 0.025 mm^{-1} , the roof flush intensity was much larger than the ground. The flush coefficient of dissolved-bound of COD and granular-bound of COD was similar on the slope roof. The flush coefficient of granular-bound of COD was greater than the dissolved-bound of COD on the flat roof and the concrete road.

Key words underlying surface; rainfall flush; runoff; flush coefficient

在点源污染得到有效治理后,非点源污染已经成为各地水环境的最大威胁,是影响水生态系统稳定的关键因素^[1-2]。城市地表径流污染是仅次于农业面源污染的第二大非点源污染^[3],也是城市水环境的主要污染源。城市地表径流主要来源于硬化下垫面(人行道、车道、停车场、屋顶等)^[4]。非点源污染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^[5]。非点源污染具有发生随机性、排放间歇性和时空变化幅度大等特点。影响城市地表径流污染的因素包括降雨强度、降雨量、降雨历时、城市土地利用类型、大气污染状况和地表清扫状况等^[6]。

目前,国内外关于城市降雨径流污染的研究主要集中在降雨径流污染时空分布及影响因素、降雨径流水质状况、降雨径流污染排放规律等方面。车武等^[7]通过对北京市屋面径流的监测,发现屋面径流初期污染的可生化性不高,主要的污染指标是COD(化学需氧量)和SS(悬浮物)。韩冰等^[8]通过对北京市地面径流、屋面径流监测,发现大多数路面径流污染物浓度>屋面径流污染物浓度,颗粒吸附态的污染物含量排序为TP(总磷)>COD>TN(总氮)。任玉芬等^[9]发现北京不同功能区道路沉积物中TN和TP的含量均较高,氮主要以可溶态形式赋存,磷主要以颗粒态形式赋存。李春林等^[10]通过对沈阳市典型区域坡顶屋面、平顶屋面和路面3种下垫面的降雨径流监测,发现50%~90%的降雨事件产生初期冲刷现象,初期冲刷的强度依次是平屋面>坡屋面>路面。李贺等^[11]研究冲刷模型在上海市屋面径流的应用,得到夏季径流冲刷系数 K 值为 0.14 mm^{-1} ,冬季则高达 0.54 mm^{-1} 。李青云^[12]通过统计北京村镇降雨径流,得出冲刷模型中的冲刷系

数 K 值变化范围为 $0.001\sim 0.05 \text{ mm}^{-1}$ 。城区降雨径流过程主要受降雨过程和下垫面变化的影响。目前,针对城市硬化下垫面降水冲刷过程及其变化规律的研究相对缺乏。

本研究选取常州市典型硬化下垫面,研究不同场次降雨径流EMC浓度变化特征,溶解态污染物、颗粒态污染物与全量污染物的比例关系,以及不同下垫面径流污染物浓度随降雨冲刷的变化特征,应用冲刷模型模拟污染物冲刷规律,为管理城市不同下垫面非点源污染提供科学依据。

1 研究区与研究方法

1.1 研究区概况

常州市位于江苏省南部,总土地面积为 4653 km^2 ,建成区面积为 204 km^2 ,建成区绿化率为42.92%,城镇化率达到68.70%。常州市属湿润季风气候,四季分明,全年平均降水量为 1091.60 mm ,月均降水量为 108.42 mm 。全年平均气温为 15.80° ,月均气温为 16.80° ^[13]。常州市中心城区含武进区、新北区、天宁区和钟楼区,总面积为 1862 km^2 ,其中屋面面积占21%,地面面积占15%,道路面积占14%,水域面积占11%,绿地面积占39%。常州市属于太湖流域,控制其非点源污染对太湖流域的水污染控制具有重要意义。

1.2 采样点分布

下垫面指地表各类覆盖物的组成。影响城市水循环过程的下垫面要素主要包括地质、地貌、植被和人为建筑物等4类^[14]。按照城市土地利用的性质,从下渗角度考虑,可以将城市地区下垫面划分为硬化面和透水面两类。屋面和路面是城市下垫面中典型的硬化下垫面。通过对常州市的实地调查,

本文选择 5 种典型硬化下垫面进行研究, 分别是斜屋面、平屋面、水泥地面、沥青地面和铺装地面。各硬化下垫面的基本特征如表 1 所示。

1.3 样品采集

根据天气形势预报, 于 2015 年 3 月、4 月和 8 月, 全过程采集降雨过程的雨水和径流。共采集 6 场降雨(见表 2)径流, 采集样品 189 个, 其中屋面径流样品 74 个, 地面径流样品 107 个, 天然雨水样品 8 个。6 场降雨事件的特征差异较大, 降雨量为 2.00~65.28 mm, 降雨历时 65~394 分钟, 平均降雨强度为 0.35~24.63 mm/h, 雨前干旱天数为 0.25~6 天。水样采集由人工完成。从产流时刻开始, 采集第 1 个样品, 记录开始和结束的时间; 从距离产流时刻的 5, 10, 15, 20, 30, 40 和 60 分钟, 依次采集第

2~8 个样品, 记录每瓶样品的开始和结束时间。根据降雨量和降雨历时, 灵活调整采样的时间间隔和样品个数。用标刻度的小桶或盆采集屋面和水泥地面的降雨径流, 再用漏斗转移到采样瓶中; 其他样品均使用采样瓶直接采集。水质监测指标包括总悬浮固体(SS)、氨氮(NH₃-N)、全量和溶解态的化学需氧量(COD)、总磷(TP)以及总氮(TN)。

1.4 样品处理与分析方法

地表污染物冲刷水样保存在聚乙烯瓶内, 密封后置于遮光处。采样结束后, 当天将样品送实验室, 置于 4℃ 冰箱冷藏。将样品混匀后, 立即取样测试全量污染物浓度。溶解态污染物浓度测试前先将样品混匀, 用孔径 0.45 μm 的滤膜过滤。样品检测方法见表 3。

表 1 硬化下垫面的基本特征
Table 1 Characteristics of the hardened surface

下垫面类型	监测地点	材质	坡度/%	汇水面积/m ²	垃圾清扫类型及频率
斜屋面	藻江花园	红瓦	≥20	—	—
平屋面	绿洲家园	水泥	2~5	—	—
水泥地面	庆阳路	水泥	≥0.5	291.38	人工清扫, 巡逻式
沥青地面	龙城大道	沥青	≥0.5	907.50	人工清扫, 4 次/天 清扫车, 至少 1 次/天
铺装地面	百草园小学	人行道铺装砖块	≤4	140.00	人工清扫 2 次/天, 其余巡逻式

表 2 典型降雨事件降雨特征
Table 2 Characteristics of the typical monitoring rainfall

采集场次	日期	降雨历时/min	降雨量/mm	雨前干旱天数/d	平均降雨强度/ (mm·h ⁻¹)	雨强类型	样品数量/个
第一场	2015/03/17	65	13.40	3	12.37	大雨	13
第二场	2015/04/19	71	2.00	5	1.69	小雨	22
第三场	2015/08/07	102	7.00	6	4.12	中雨	18
第四场	2015/08/09	81	11.20	0.88	8.30	大雨	15
第五场	2015/08/10	394	2.29	0.25	0.35	小雨	71
第六场	2015/08/15	159	65.28	4	24.63	暴雨	50

表 3 水质监测指标与方法
Table 3 Water quality monitoring indicators and methods

监测项目	监测方法
悬浮物(SS)	重量法(GB11901-1989)
化学需氧量(COD)	重铬酸盐法(GB11914-1989)
总磷(TP)	钼酸铵分光光度法(GB11893-1989)
总氮(TN)	碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法(HJ535-2009)
氨氮(NH ₃ -N)	纳氏试剂分光光度法(HJ636-2012)

说明: 采样方法依据《水和废水监测分析方法(第四版)》。

1.5 数据分析

1.5.1 场次降雨径流污染物平均浓度(EMC)

EMC 是任意一场降雨引起的地表径流中排放的某污染物质的质量除以总径流量, 可以用下式计算:

$$EMC = \frac{M}{V} = \frac{\int_0^{t=T} C_t Q_t dt}{\int_0^{t=T} Q_t dt}, \quad (1)$$

M 为某场降雨径流所排放的某污染物总量(kg), V 为某场降雨所形成的地表径流(m^3), C_t 为某污染物在 t 时的瞬时浓度(mg/L), Q_t 为地表径流在 t 时的瞬间流量(m^3/s), T 为某场降雨总历时(s)。

1.5.2 初期冲刷效应

初期冲刷现象的判定一般基于无量纲累积污染物-径流量曲线, 即 $M(V)$ 曲线^[15]。累积污染物负荷是指一次降雨过程中, 污染物随时间的累积量与污染物总量的比值。累积径流量是指一次降雨过程中, 径流量随时间的累积量与径流总量的比值。Gupta 等^[15]发现, $M(V)$ 曲线完全位于对角线的上方就表明产生初期冲刷效应。

1.5.3 Sartor-Boyd 冲刷模型

Sartor 等^[16]于 1974 年提出一种渐近的数字型冲刷模型。Sartor-Boyd 冲刷模型假定径流过程中不透水地面表层沉积物的冲刷速率与地表沉积的污染量(P)及降雨强度(r)成正比:

$$\frac{dP}{dt} = k_2 \times P \times r, \quad (2)$$

式中, k_2 是冲刷系数(mm^{-1}), P 是降雨开始时地表沉积的污染量(kg); r 为单位时间单位面积雨水径流量, 即降雨强度或径流深度($\text{mm} \times \text{min}^{-1}$); t 为时间(min)。对式(2)积分, 可得到 t 时刻因降雨径流冲刷而排放的污染量 $P(t)$:

$$P(t) = P_0 \times (1 - e^{-k_2 R_t}), \quad (3)$$

式中, P_0 表示降雨开始时地表沉积的污染量(kg); $R_t = \int r \times dt$ 表示降雨开始 t 时间后累计的降雨深度(mm)。降雨径流过程中, 降雨冲刷排污速率和径流中的污染物浓度随累积径流量呈指数降低。假设集雨面积为 $A(\text{m}^2)$, 则地表径流形成后 t 时刻地表径流中的污染物浓度 $C(t)$ 可由 $P(t)$ 对 R_t 求导获得:

$$C(t) = -\frac{1}{A} \frac{dP}{dR_t} = \frac{k_2 P_0}{A} e^{-k_2 R_t} = C_0 \times e^{-k_2 R_t}, \quad (4)$$

式中, C_0 是径流产生时刻, 即 0 时刻地表径流中的污染物浓度(mg/L)。

2 结果与讨论

2.1 降雨冲刷污染物水质特征

2.1.1 雨水特征与各下垫面 EMC 均值

表 4 显示 6 场降雨中雨水污染物浓度均优于地

表水环境质量 V 类水标准。屋面、地面径流共 6 场地表降雨径流的 SS, COD, TP, $\text{NH}_3\text{-N}$ 和 TN 的 EMC 平均值如表 5 所示。常州市屋面与地面径流污染物主要污染物为 SS 和 COD, 地面径流中浓度分别为 200.38 和 103.81 mg/L 。地面 SS 主要来源于人类活动、机动车辆行驶、含磷垃圾以及污水积聚路面产生颗粒物, 使得大量 SS 颗粒物累积在地面^[17]。屋面受人为因素干扰较小, 颗粒物主要来源于大气降尘。大多数污染物均超过 V 类标准, 地面径流 EMC 平均值 > 屋面径流 EMC 平均值。地面径流 SS 和 COD 浓度分别超过水质标准 V 类 1.34 倍和 2.59 倍。屋面径流中 COD 和 TN 浓度分别超过 V 类标准 1.8 倍和 2.6 倍, 大气湿沉降对径流中 TN 的贡献较大^[18-19]。

表 4 常州市雨水污染物平均浓度(mg/L)

Table 4 Average concentration of rainwater Pollutants in Changzhou City (mg/L)

类型	SS	COD	TP	$\text{NH}_3\text{-N}$	TN
雨水平均浓度	12	22.64	0.044	1.37	1.67
地表水 V 类标准	150	40	0.4	2.0	2.0

表 5 屋面径流和地面径流的 EMC 平均值(mg/L)

Table 5 Average EMCs of pollutants in roof runoff and road runoff (mg/L)

类型	SS	COD	TP	$\text{NH}_3\text{-N}$	TN
屋面	114.33	71.35	0.14	2.18	5.28
地面	200.38	103.81	0.18	1.24	4.07
地表水 V 类标准	150	40	0.4	2.0	2.0

2.1.2 污染物颗粒态、溶解态比例

在降雨径流的冲刷过程中, 污染物组成中除溶解态的污染物外, 还含有大量的颗粒态污染物。研究颗粒态污染物, 可以明确污染物的赋存方式、主要迁移的组分特点及其去除污染物的方法^[20]。图 1 为分析溶解态、颗粒态污染物占全量的比例, 结果显示屋面径流中 COD 和 TN 均以溶解态为主, TP 以颗粒态为主。地面径流中 COD 和 TP 以颗粒态为主, TN 以溶解态为主。图 1(a)显示屋面径流中溶解态 COD, TP 和 TN 分别占 72.78%, 36.96% 和 57.99%, 地面径流中溶解态 COD, TP 和 TN 分别占 36.99%, 39.52% 和 61.59%。图 1(b)显示屋面径流中颗粒态 COD, TP 和 TN 分别占 27.22%, 63.04% 和 42.01%, 地面径流中颗粒态 COD, TP 和 TN 分别占

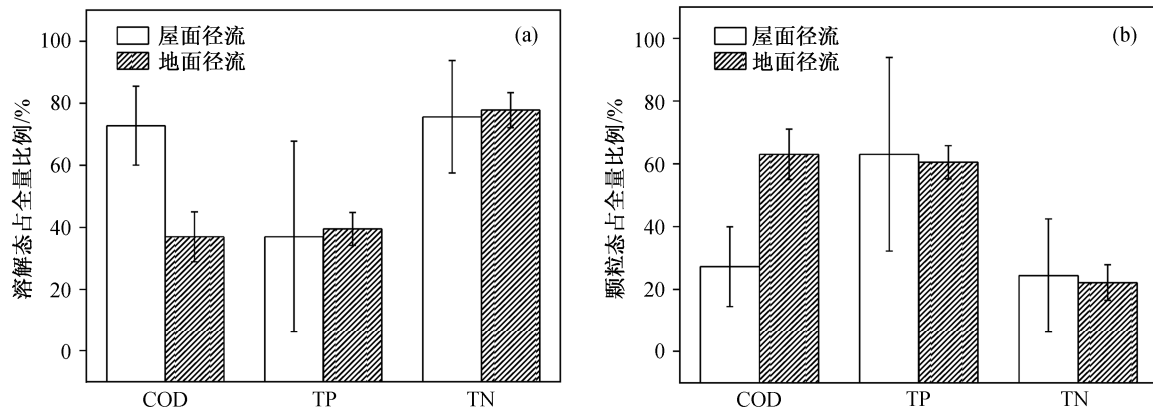


图 1 溶解态(a)和颗粒态(b)污染物占全量的比例
Fig. 1 Dissolved-bound (a) and granular bound (b) fractions of pollutants

63.01%, 60.48%和 8.41%。这一结果与龙剑波等^[21]、王彪等^[22]和 Hwang 等^[23]的研究结果基本上一致。根据屋面、地面径流中 COD, TP 和 TN 的形态组成, 应对屋面径流和地面径流分别进行控制。颗粒态有机物主要通过沉降等方式去除, 溶解态有机物则需要通过人工湿地、植物修复等方式进行深度处理^[24]。

2.1.3 污染物浓度相关性

6 场降雨径流各项污染物浓度的 Spearman 相关性分析结果如表 6 所示。径流污染物中 SS 与 COD 和 TP 高度相关, 相关系数 r 分别为 0.81 和 0.72。SS 是降雨径流污染的主要污染物, 并且是 COD 和 TP 等污染物的载体。COD 与 TP 高度相关, 相关系数 r 为 0.79。TN 与氨氮高度相关, 相关系数 r 为 0.73。其余各污染物的相关系数 $|r|$ 变化范围在 0.04~0.56 之间, 为中低度相关。

2.1.4 溶解态污染物浓度变化特征

选取 8 月 15 日降雨场次, 硬化下垫面选择红瓦斜屋面, 各污染物浓度变化如图 2 所示。结果表

明, 各污染物全量与溶解态随降雨历时变化趋势相同, 降雨初期冲刷出污染物的浓度逐渐升高, 达到最大值后逐渐下降。图 2(a)和(c)显示降雨初期, 地面径流的冲刷作用强, 溶解态 COD 和 TN 浓度达到最高值 90.60 和 5.82 mg/L。随着降雨的延续, 溶解态 COD 和 TN 浓度迅速降低, 最终与全量 COD 和 TN 浓度处在同一水平, 这与 Kim 等^[25]的研究结果相似。图 2(b)显示溶解态 TP 浓度与全面 TP 浓度变化趋势一致, 偶尔有波动。本场次降雨中 COD 和 TN 污染物主要以溶解态被冲刷出, TP 则主要以颗粒态被冲刷出。

2.2 降雨冲刷污染物变化特征

2.2.1 不同下垫面污染物浓度变化特征

选取 8 月 15 日典型降雨场次, 不同硬化下垫面污染物随降雨强度变化的结果如图 3 所示。随着降雨强度增大, 污染物浓度迅速升高, 到达峰值后逐渐降低, 最终趋于某一稳定值。图 3(a)显示 SS 初期浓度由大到小依次水泥地面、铺装地面、沥青地面、斜屋面和平屋面。水泥地面和沥青地面的

表 6 降雨径流污染物相关性
Table 6 Relationships between rainfall runoff pollutant

污染物	SS	COD	TP	NH ₃ -N	TN	溶解态 COD	溶解态 TP	溶解态 TN
SS	1.00							
COD	0.81**	1.00						
TP	0.72**	0.79**	1.00					
NH ₃ -N	0.29**	0.55**	0.32**	1.00				
TN	0.26**	0.56**	0.45**	0.73**	1.00			
溶解态 COD	0.10	0.14	0.04	0.20	0.06	1.00		
溶解态 TP	0.04	0.15	-0.08	0.47**	0.47**	-0.06	1.00	
溶解态 TN	0.22	0.06	0.08	-0.07	-0.26*	0.55**	-0.05	1.00

注: *表示在 5%水平上显著相关, **表示在 1%水平上显著相关。

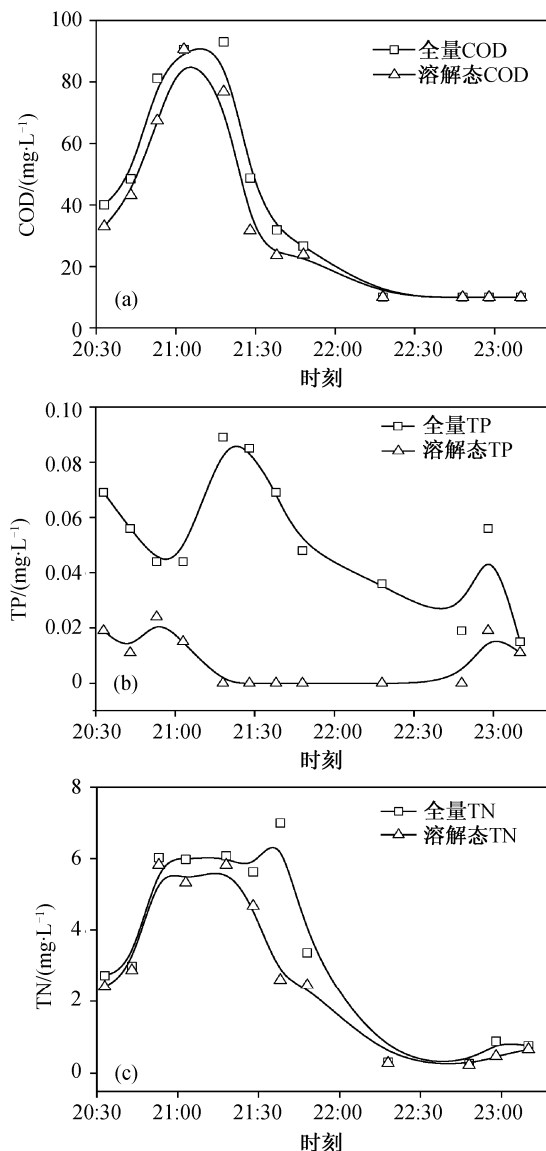


图2 典型场次降雨斜屋面全量、溶解态污染物浓度随时间变化曲线

Fig. 2 Curve of pollutants, dissolved pollutants value with sampling time in inclined roof

SS 浓度呈多峰型, 最大峰值分别出现在 19 和 70 分钟左右。水泥地面较光滑, 污染物容易被冲刷出, 浓度最大峰值比沥青地面提前。沥青地面存在大量孔隙, 污染物无法被快速冲刷出。铺装地面 SS 浓度呈递减趋势。屋面 SS 浓度变化较小。图 3(b)显示 COD 初期浓度从大到小依次为沥青地面、铺装地面、水泥地面、平屋面和斜屋面。COD 随降雨强度变化趋势与 SS 变化趋势基本上一致。水泥地面、沥青地面 COD 浓度变化呈双峰型, 最大峰值分别出现在采样初期和 54 分钟。平屋面、斜屋面 COD 浓度变化呈单峰型, 最大峰值分别出现采样

初期和在 45 分钟。图 3(c)显示 $\text{NH}_3\text{-N}$ 初期浓度从大到小依次为平屋面、铺装地面、斜屋面、水泥地面和沥青地面。 $\text{NH}_3\text{-N}$ 浓度随着降雨过程逐渐降低, 波动剧烈, 最终降低为稳定值。图 3(d)显示平屋面 TN 初期浓度最大。TN 浓度随降雨过程逐渐降低。图 3(e)显示沥青地面 TP 初期浓度最大。TP 随降雨强度变化趋势与 SS 变化趋势基本上一致。

2.2.2 不同下垫面污染物负荷量

斜屋面、平屋面、沥青地面、水泥地面和铺装地面污染物总负荷量分别为 47962.738, 40421.376, 144236.887, 68448.276 和 27583.245 mg (表 7), 总负荷量从大到小依次为沥青地面、水泥地面、斜屋面、平屋面和铺装地面。沥青地面氨氮负荷量最小, 斜屋面 SS 负荷量最小。

2.2.3 不同下垫面污染物初期冲刷效应

选取 8 月 15 日降雨数据, 绘制各下垫面污染物无量纲累积污染物-径流量曲线 $M(V)$ 曲线 (图 4)。斜屋面、平屋面和水泥地面各污染物 $M(V)$ 累积曲线均在 45° 斜度线以上, 说明均存在初期冲刷。沥青地面仅有 SS 发生初期冲刷, 其他污染物初期冲刷不显著。斜屋面、平屋面、沥青地面、水泥地面 4 种下垫面的降雨径流 FF_{30} 主要集中在 0.812~0.880, 0.834~0.968, 0.294~0.422 以及 0.519~0.630, 即在前 30% 降雨径流中, 斜屋面含 81.2%~88.0% 污染负荷, 平屋面含 83.4%~96.8% 污染负荷, 沥青地面含 29.4%~42.2% 污染负荷, 水泥地面含 51.9%~63.0% 污染负荷。斜屋面、平屋面、水泥地面和沥青地面的 FF_{30} 平均值分别为 0.852, 0.912, 0.562 和 0.352, 初期冲刷强度从大到小为平屋面、斜屋面、水泥地面和沥青地面, 累积负荷分别为 91.2%, 85.2%, 56.2% 和 35.2%。这是由于相对于屋面, 路面是一个较开放的区域, 因降雨量、降雨历时汇水区域不同, 汇水区周围的污染物也会随径流汇入监测点, 使得初期冲刷效应不明显。另外, 交通状况极大地干扰地面初期冲刷现象。总体上, 屋面初期冲刷强度大于地面初期冲刷强度, 这与任玉芬等^[26]的研究结果相一致。

2.2.4 不同降雨场次污染物变化特征

选取 3 月 17 日、4 月 19 日和 8 月 15 日三场降雨, 分析平屋面 SS 浓度随降雨历时的变化情况, 结果如图 5 所示。图 5(a)显示 3 月 17 日降雨量为 13.4 mm, 平均雨强为 12.37 mm/h, 雨强类型为大雨, 降雨过程属于初期降雨密集、后期降雨变小类

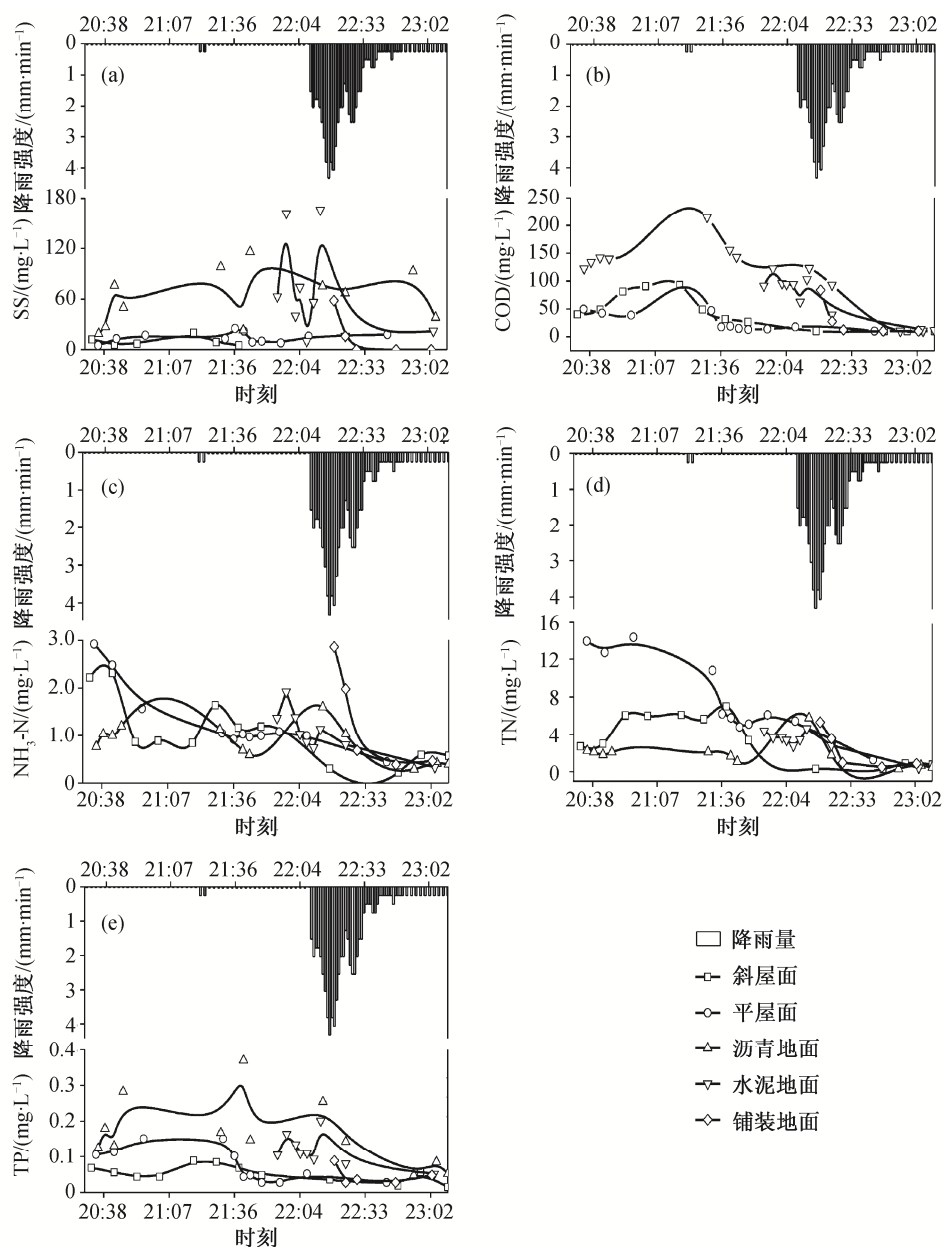
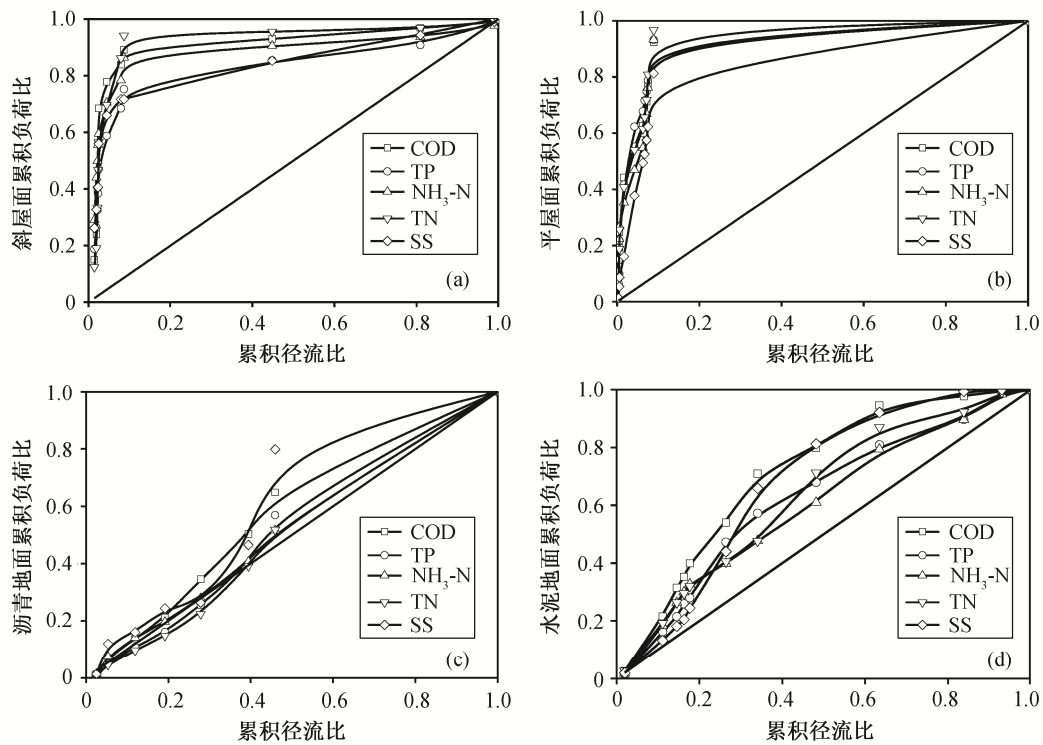


图 3 典型场次降雨不同硬化下垫面污染物浓度随时间冲刷过程
Fig. 3 Curve of pollutants value with sampling time in different hardened surface

表 7 各下垫面污染物负荷量(mg)
Table 7 Load quantity of pollution on different underlying surface (mg)

下垫面	COD	TP	NH ₃ -N	TN	SS	总负荷
斜屋面	36670.191	46.168	939.619	3076.295	7230.467	47962.738
平屋面	22605.086	59.575	1022.860	5917.253	10816.601	40421.376
沥青地面	55496.022	71.758	366.091	793.745	87509.271	144236.887
水泥地面	34098.194	43.306	399.451	1162.296	32745.029	68448.276
铺装地面	13894.849	15.459	430.482	753.967	12488.488	27583.245

图4 不同下垫面污染物 $M(V)$ 曲线Fig. 4 Curves of $M(V)$ contaminants on different underlying surface

型。SS 浓度呈指数型衰减, 峰值出现在降雨初期, 为 447 mg/L。20 分钟后下降至 52 mg/L, 趋于稳定, 径流初期的浓度为后期稳定时浓度的 8.60 倍, 初期效应显著。9~13 分钟, 污染物浓度缓慢上升, 10 分钟时降雨量增大, 污染物浓度随降雨量的变化具有延后性。图 5(b)显示 4 月 19 日降雨量为 2 mm, 平均雨强为 1.69 mm/h, 雨强类型为小雨, 降雨过程属于平稳变化类型。SS 浓度变化曲线表现为 0~25 分钟稳定, 25~30 分钟急剧下降, 30 分钟后趋于稳定。SS 浓度峰值出现在降雨前期, 为 53 mg/L, 明显低于 3 月 17 日的初期浓度, 主要由降雨量过小导致。图 5(c)显示 8 月 15 日的降雨量为 65.28 mm, 平均雨强为 24.63 mm/h, 雨强类型为暴雨, 降雨过程属于前期降雨稀疏, 后期降雨密集, 最高峰值出现在后期。SS 浓度变化呈多峰型, 初期浓度最低, 仅为 5 mg/L, 20 分钟时达到第一个峰值, 最高峰值出现在 60 分钟, 为 25 mg/L, 90 分钟达到第 3 个峰值。8 月 15 日的 SS 初期浓度明显低于 3 月 17 日和 4 月 19 日, 是因为采样前期降雨量小且稀疏, 且 8 月 7 日至 15 日常州市连续大雨, 将污染物冲刷得较干净。

2.3 冲刷模型模拟

国内外研究非点源降雨冲刷的模型包括比例径流曲线、场次平均方程和指数冲刷模型(Sartor-Boyd 冲刷模型) 3 种。比例径流曲线方程和场次平均方程均仅考虑径流量对冲刷过程的影响, 指数冲刷模型同时考虑污染物累积量和降雨径流量对冲刷过程影响的模型, 故比例径流曲线、场次平均方程均不适用于本研究中不同下垫面冲刷过程模拟。另外, 指数冲刷模型仅适用于存在初期冲刷效应的地表径流过程^[27], 所以只对斜屋面、平屋面和水泥路面的污染物冲刷过程进行模拟。

选取 4 月 19 日和 8 月 15 日降雨事件, 采用指数冲刷模型对不同硬化下垫面 COD 浓度和累积降雨量进行指数拟合, 模拟结果如图 6 所示。大多数降雨冲刷过程符合冲刷模型, 斜屋面和平屋面的模拟精度较高, R^2 在 0.676~0.964 之间。两屋面的全量 COD 浓度拟合最好, R^2 均大于 0.950。水泥地面 COD 浓度比屋面拟合度低, R^2 为 0.726~0.782。不同下垫面的 COD 浓度随累积降雨量呈单调递减趋势。

对常州市硬化下垫面降雨径流数据进行分析,

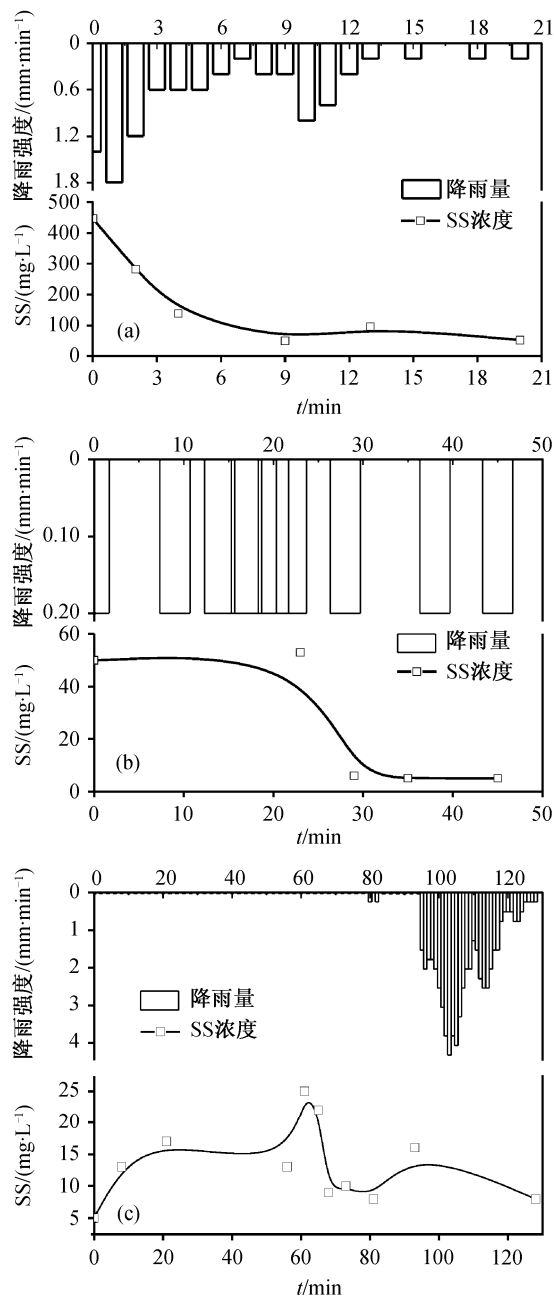


图 5 不同降雨条件平屋面 SS 浓度变化特征

Fig. 5 Characteristics of SS concentration in different rainfall conditions on flat roofs

得出全量污染物冲刷系数 k_2 值变化范围为 $0.025 \sim 0.871 \text{ mm}^{-1}$ (表 8)。全量污染物冲刷系数排序为斜屋面 > 平屋面 > 水泥地面, 冲刷强度排序为斜屋面 > 平屋面 > 水泥地面。斜屋面冲刷系数最大为 0.871 mm^{-1} , 水泥地面冲刷系数最小为 0.025 mm^{-1} 。相同的平均降雨强度下, 斜屋面冲刷系数大于平屋面冲刷系数, 可能由屋面的材质、坡度等相关因素导致。斜屋面溶解态 COD 与颗粒态冲刷系数相近, 说明溶解态

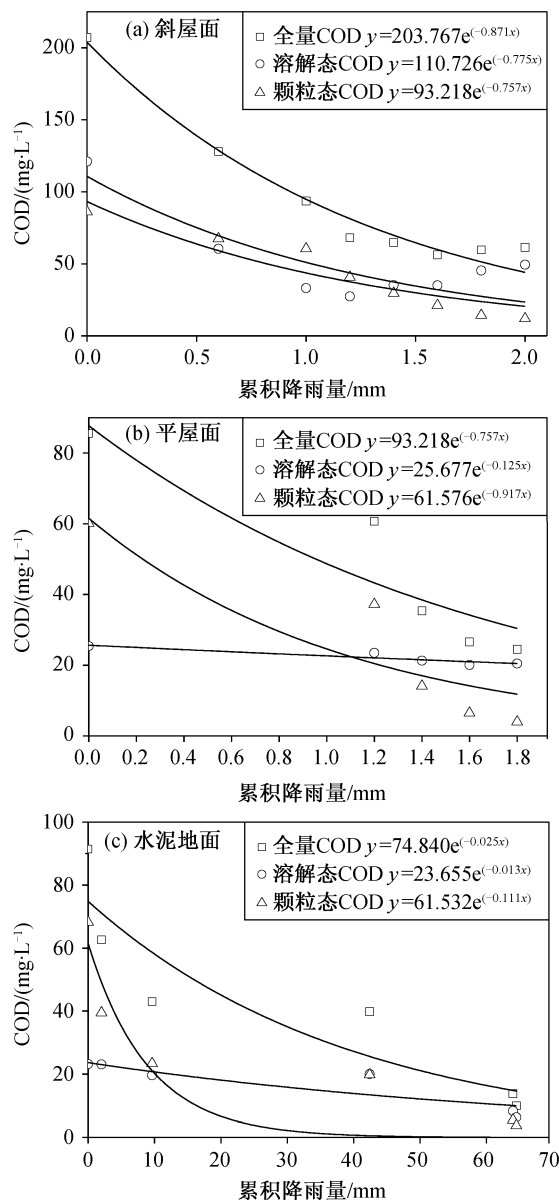


图 6 不同下垫面 COD 浓度冲刷拟合曲线

Fig. 6 Scouring fitting curve of COD concentration on different underlying surface

COD 与颗粒态 COD 在斜屋面上冲刷强度较大。平屋面上颗粒态 COD 的冲刷系数远大于溶解态 COD 的冲刷系数。水泥地面颗粒态 COD 冲刷系数大于溶解态 COD 冲刷系数, 主要由于水泥地面颗粒态 COD 占比更大, 冲刷强度也更大。

3 结论

1) 常州市天然雨水污染物浓度均未超过地表水环境质量 V 类水标准。屋面和地面径流中 SS, COD 和 TN 的 EMC 均值劣于地表水 V 类水质标

表 8 不同硬化下垫面冲刷系数
Table 8 The wash-off coefficient of different hardened surfaces

下垫面类型		污染物类型	平均降雨强度/(mm·h ⁻¹)	k_2 /(mm ⁻¹)	R^2
屋面	斜屋面	全量 COD	1.69	0.871	0.964
		溶解态 COD		0.775	0.676
		颗粒态 COD		0.757	0.859
	平屋面	全量 COD	1.69	0.765	0.950
		溶解态 COD		0.125	0.804
		颗粒态 COD		0.917	0.760
地面	水泥地面	全量 COD	24.63	0.025	0.782
		溶解态 COD		0.013	0.726
		颗粒态 COD		0.111	0.762

准；大多数地面径流污染物平均 EMC 值大于屋面径流平均 EMC 值。屋面径流中，COD 和 TN 主要以溶解态存在，TP 主要以颗粒态存在；地面径流中，TN 主要以溶解态存在，COD 和 TP 主要以颗粒态存在。

2) 地面 SS、COD 和 TP 初期浓度大于屋面污染物浓度，屋面 TN 和氨氮初期浓度大于地面污染物浓度。冲刷过程中，随降雨强度增大，各下垫面污染物浓度升高，呈波动式变化；沥青地面污染物负荷量最大。下垫面初期冲刷强度从大到小依次为平屋面、斜屋面、水泥地面和沥青地面。不同降雨强度下，前期降雨强度越大，污染物初期浓度越大，初期效应越显著。降雨强度为大雨时，SS 浓度呈指数型衰减。降雨强度为小雨时，SS 浓度先稳定，随着降雨变密集开始衰减。降雨强度为暴雨，但降雨过程集中在中后期时，SS 浓度呈先增大后减小的变化趋势。

3) 指数冲刷模型对各硬化下垫面污染物径流冲刷模拟效果较好，不同硬化下垫面模拟的相关系数在 0.676~0.964 之间。斜屋面、平屋面和水泥屋面全量污染物冲刷系数分别为 0.871，0.765 和 0.025 mm⁻¹。斜屋面溶解态 COD 与颗粒态 COD 冲刷系数相近，冲刷强度大。平屋面与水泥地面的颗粒态 COD 冲刷系数均大于溶解态 COD，颗粒态 COD 冲刷更加强烈。

参考文献

[1] Wang X L, Wang Q, Wu C Q, et al. A method coupled

with remote sensing data to evaluate non-point source pollution in the Xin'anjiang catchment of China. *Science of the Total Environment*, 2012, 430: 132–143

- [2] Schumann A H, Koncsos L, Schultz G A. Estimation of dissolved pollutant transport to rivers from urban areas: a modelling approach. *Sediment and Stream Water Quality in a Changing Environment: Trends and Explanation*, 1991, 203: 267–276
- [3] Deletic A B, Maksimovic C T. Evaluation of water quality factors in storm runoff from paved areas. *J of Envir Engrg: ASCE*, 1998, 124(9): 869–879
- [4] Vaze J, Chiew F H S. Nutrient loads associated with different sediment sizes in urban stormwater and surface pollutants. *Journal of Environmental Engineering*, 2004, 130(4): 391–396
- [5] 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): 87–91
- [6] 赵剑强. 城市地表径流污染与控制. 北京: 中国环境科学出版社, 2002
- [7] 车武, 汪慧珍, 任超, 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
- [8] 韩冰, 王效科, 欧阳志云. 北京市城市非点源污染特征的研究. *中国环境监测*, 2005, 21(6): 63–65
- [9] 任玉芬, 王效科, 欧阳志云, 等. 北京城区道路沉积物污染特性. *生态学报*, 2013, 33(8): 2365–2371
- [10] 李春林, 刘淼, 胡远满, 等. 沈阳市降雨径流初期冲刷效应. *生态学报*, 2013, 33(18): 5952–5961
- [11] 李贺, 李田, 陈阳, 等. 冲刷模型在屋面径流计算中的应用. *中国给水排水*, 2006, 22(2): 73–74

- [12] 李青云. 北京典型村镇降雨径流水文, 水质及污染特性的研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2011
- [13] 江苏省统计局, 国家统计局江苏调查总队. 江苏统计年鉴. 北京: 中国统计出版社, 1990–2015
- [14] 史培军, 袁艺, 陈晋. 深圳市土地利用变化对流域径流的影响. 生态学报, 2001, 21(7): 1041–1049
- [15] Gupta K, Saul A J. Specific relationships for the first flush load in combined sewer flows. *Water Research*, 1996, 30(5): 1244–1252
- [16] Sartor J D, Boyd G B, Agardy F J. Water pollution aspects of street surface contaminants. *Journal of Water Pollution Environmental Federation*, 1974, 46(3): 458–467
- [17] Vaze J, Chiew F H S. Nutrient loads associated with different sediment sizes in the urban stormwater and surface pollutants. *Journal of Environmental Engineering*, 2004, 130(4): 391–396
- [18] 侯培强, 任玉芬, 王效科, 等. 北京市城市降雨径流水质评价研究. *环境科学*, 2012, 33(1): 71–75
- [19] 荆红卫, 华蕾, 郭婧, 等. 北京市水环境非点源污染监测与负荷估算研究. *中国环境监测*, 2012, 28(6): 106–111
- [20] Sheng Y, Ying G, Sansalone J. Differentiation of transport for particulate and dissolved water chemistry load indices in rainfall-runoff from urban source area watersheds. *Journal of Hydrology*, 2008, 361(1/2): 144–158
- [21] 龙剑波, 李兴扬, 王书敏, 等. 城市区域不同屋顶降雨径流水质特征. *环境工程学报*, 2014, 8(7): 2895–2900
- [22] 王彪, 李田, 孟莹莹, 等. 屋面径流中营养物质的分布形态研究. *环境科学*, 2008, 29(11): 3035–3042
- [23] Hwang H M, Foster G D. Characterization of polycyclic aromatic hydrocarbons in urban stormwater runoff flowing into the tidal Anacostia River, Washington D C, USA. *Environmental Pollution*, 2006, 140(3): 416–426
- [24] 解建光, 张雪, 李贺. 高速公路路面雨水径流有机污染物赋存状态研究. *中国环境科学*, 2009, 29(10): 1047–1051
- [25] Kim L H, Ko Seok-Oh, Jeong S, et al. Characteristics of washed-off pollutants and dynamic EMCs in parking lots and bridges during a storm. *Science of the Total Environment*, 2007, 376(1/2/3): 178–184
- [26] 任玉芬, 王效科, 欧阳志云, 等. 北京城市典型下垫面降雨径流污染初始冲刷效应分析. *环境科学*, 2013, 34(1): 373–378
- [27] 陈桥, 胡维平, 章建宁. 城市地表污染物累积和降雨径流冲刷过程研究进展. *长江流域资源与环境*, 2009, 18(10): 992–996