

DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdtqk.2018.0128

古明哲,常素云,许伟,等.天津市雨水径流污染指标分类及污染源解析[J].南水北调与水利科技,2018,16(5):85-92,101.
GU M Z, CHANG S Y, XU W, et al. Classification of rainwater runoff pollution indexes and analysis of pollution sources in Tianjin urban area[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2018, 16(5): 85-92, 101. (in Chinese)

天津市雨水径流污染指标分类及污染源解析

古明哲¹,常素云²,许伟²,占强²

(1. 天津大学 环境工程与科学学院,天津 300350; 2. 天津市水利科学研究院,天津 300061)

摘要:在运用主成分分析方法的基础上,对天津市降雨的屋面径流以及菜市场路面径流进行了采样分析。对样本的特征性指标 SS、COD、氨氮、总氮和总磷进行分类分析,尝试分析出不同下垫面产生的雨水径流污染物的污染源,并分析各污染物初始冲刷效应。分析结果表明:屋面径流的特征性污染物中总氮、氨氮和 COD 组成为同一类指标,说明其潜在的第一类主要污染源为机动车尾气、大气干湿沉降以及屋面材料析出物。总磷和 SS 分别归为另两类指标,其潜在的第二类污染源为建筑工地污染以及机动车损耗。菜市场路面径流的特征性污染中 SS、总磷和 COD 可组成同一类指标,说明其潜在主要污染源为机动车损耗以及生活垃圾污染。氨氮和总氮可归为另一类指标,说明大气干湿沉降和机动车尾气排放为第二类污染源。路面较屋面更易形成初始冲刷效应,并且氨氮的初始冲刷效应显著,存在污染源的持续输入。

关键词:不同下垫面;降雨径流;污染源;主成分分析;初始冲刷效应

中图分类号: X522 文献标志码: A 文章编号: 1672-1683(2018)05-0085-08

Classification of rainwater runoff pollution indexes and analysis of pollution sources in Tianjin urban area

GU Mingzhe¹, CHANG Suyun², XU Wei², ZHAN Qiang²

(1. School of Environmental Engineering and Science, Tianjin University, Tianjin 300350;

2. Tianjin Hydraulic Research Institute, Tianjin 300061, China)

Abstract: Based on the method of principal component analysis, we sampled and analyzed the roof runoff at residential area and road surface runoff at grocery market in Tianjin urban area. We classified and analyzed the characteristic indexes of SS, COD, ammonia nitrogen, total nitrogen, and total phosphorus, attempted to find out the sources of runoff pollutants produced on different underlying surfaces, and analyzed the first flush effect of each pollutant. Analysis results showed that the total nitrogen, ammonia nitrogen, and COD among the characteristic pollutants of roof rainwater runoff belonged to the same class of indexes, which means that the first kind of potential main pollution sources were vehicle emissions, atmospheric dry and wet deposition, and the roofing material precipitates. Total phosphorus and SS belonged to the other two classes, indicating that the second kind of potential main pollution sources were construction site pollution and the spoilage of vehicles. Among the characteristic pollutants of the road surface runoff at grocery market, SS, total phosphorus, and COD belonged to the same class of indexes, which means that the first kind of potential main pollution sources were the spoilage of motor vehicles and the pollution of domestic wastes. Ammonia nitrogen and total nitrogen belonged to another class, indicating that atmospheric dry and wet deposition and vehicle emission were the second potential main pollution sources. The first flush effect was more likely to occur on road surface than on the roof. There was a continuous input of pollution source and the first flush effect of ammonia nitrogen was significant.

Key words: different underlying surfaces; rainfall runoff; pollution source; principal component analysis; first flush effect

收稿日期: 2017-11-12 修回日期: 2018-04-15 网络出版时间: 2018-07-12

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20180709.1208.004.html>

基金项目: 水利部公益性行业专项(201401047); 天津市水务局科技处项目(KY2014-02)

Funds: Special Project of Public Welfare Industry of the Ministry of Water Resources (201401047); Project of Science and Technology Department of Tianjin Municipal Water Affairs Bureau (KY2014-02)

作者简介: 古明哲(1993-),男,安徽安庆人,主要从事水环境治理方面研究。E-mail: gumingzhe@tju.edu.cn

通讯作者: 常素云(1982-)女,河北邯郸人,高级工程师,博士,主要从事水环境治理方面研究。E-mail: cy@tjhri.com

近些年来,随着城市人口的逐年增加,城市规模也在进一步扩大。在降雨过程中,随着雨水对大气的淋洗作用,以及雨水径流对城市不同下垫面的冲刷作用,使得雨水径流裹挟大量污染物,污染程度不断加剧^[1]。此部分携带大量污染物的雨水最终经城市排水管网系统汇集并排入城市河湖水体,使得城市水体容纳污染物量远高于水体自净能力,导致水体环境质量变差,破坏水生生态环境。研究表明,目前雨水径流污染已成为国内外许多城市水体污染的主要原因之一^[2-5]。

经大量研究表明,城市雨水径流产生的主要污染物和污染物浓度因地而异,不同城市,不同下垫面的雨水径流污染往往存在显著差异^[6-8]。因此,要准确把握一座城市某一地区雨水径流的污染信息,则需要针对这一地区,进行不同下垫面雨水径流特征分析,得出此地区的雨水径流污染特征,不可一概而论。针对天津地区,一些研究主要分析鉴定不同区域,不同下垫面雨水径流的主要污染物和污染负荷,以及天津地区雨水径流的污染程度^[9-11]。本文拟在利用 SPSS 软件的统计分析功能对多次采样检测的 SS、COD、氨氮、总氮和总磷进行主成分分析降维,找出不同下垫面所产生的雨水径流污染物受哪几个不同内在独立因子支配,从中分析屋顶以及菜市场路面径流的潜在污染源,并分析不同下垫面各污染指标的初始冲刷效应。

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

天津地区属暖温带季风性气候,冬季寒冷干燥,夏季暖热多雨,年平均降水量约为 550~650 mm。全年降水 75% 集中在夏季,尤其是 7 月下旬至 8 月上旬期间,全年温度最高,降雨量最大。天津市主要分为和平区、河西区、河北区、河东区、南开区和红桥区,其总面积约为 173 km²,各区气候条件无明显区别,取样点设置在河东区北纬 39°06',东经 117°15'附近。

1.2 水样采集

为了获取天津市雨水径流的污染特征,在天津市河东区中山门附近范围内设置 4 个取样点对雨水径流进行取样(图 1)。1 号和 2 号取样点设置于菜市场,此地区人流量密集,处于居民住宅集中区,取样菜市场路面雨水径流。3 号和 4 号取样点设置于居民楼,处于交通要道,车流量大,取样屋顶雨水径流。

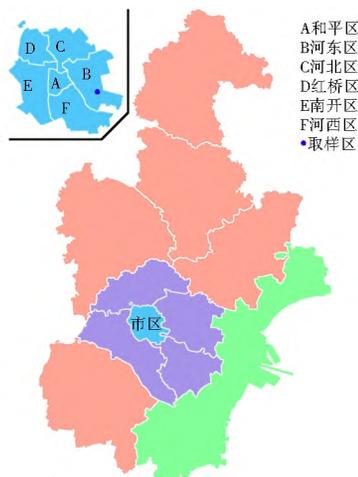


图 1 采样点方位示意图

Fig. 1 Diagrammatic sketch of sampling point position

在形成路面雨水径流区域,利用取样工具采集路面径流,样品使用聚乙烯瓶进行收集。路面径流形成后,每隔 5 min 采集一次水样。径流的峰值过后,每隔 10~20 min 采集一次,并依次标记。

对于屋面径流,从径流形成开始,使用聚乙烯瓶在雨落管出口处每隔 5 min 采集一次水样。径流的峰值过后,每隔 10~20 min 采集一次。

1.3 雨水水质分析

本文根据城市雨水径流特征^[4, 12],将水质监测指标确定为 COD、SS、总磷、氨氮和总氮,各水质指标的监测方法及监测仪器见表 1。

表 1 水质监测方法及仪器

Tab. 1 Water quality monitoring method and apparatus			
检测项目	检测方法	检测依据	使用仪器
COD	重铬酸盐法	GB 11914-89	回流装置,加热装置
总磷	钼酸铵分光光度法	GB 11893-89	双光束紫外可见
总氮	碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法	HJ 636 2012	分光光度计 TU-1901
氨氮	纳氏试剂分光光度法	HJ 535 2009	分光光度计 TU-1901
SS	重量法	GB 11901-89	分析天平 XS105

1.4 雨水径流采样总体状况

本次采样周期为 2015 年全年,有效降雨事件为 5 次。其中菜市场路面径流采样个数 135 个,屋面径流采样个数 136 个。

1.5 主成分分析

主成分分析是一种降维的统计方法,它把收集的具有一定相关关系的多个指标变量通过线性变换合成数量较少的不相关的因子,研究一组多个实测指标是如何受少数几个内在的独立因子所支配^[13-14]。

应用 SPSS 20.0 对 5 场主要降雨数据的 5 个监测指标进行了主成分分析。

1.6 数据分析

1.6.1 用于主成分分析数据的 KMO 检验和 Bartlett 检验结果

使用因子分析提取因子,原始变量首先需满足一定的线性关系。这里,借助 KMO 检验和 Bartlett 检验的方法进行判断。

KMO 检验是为了看数据是否适合进行因子分析,其取值范围是 0~1。其中,0.9~1 表示极好、0.8~0.9 表示可奖励的、0.7~0.8 表示还好、0.6~0.7 表示中等、0.5~0.6 表示糟糕、0~0.5 表示不可接受。Bartlett 检验是为了看数据是否来自于服从多元正态分布的总体。

1.6.2 主成分分析公共因子提取准则

公共因子个数的确定准则:(1)按照特征值的大小来确定,一般取特征值大于 1 的对应的几个公共因子。(2)根据因子的累积方差贡献率来确定,一般取累积贡献率达 85%~95% 的特征值所对应的主成分。本文针对这两种准则进行尝试性分析。

1.7 污染物初始冲刷分析

针对每一场降雨事件,每一种污染物绘制降雨累积污染物负荷比-累积径流量比曲线,即 M(V) 曲线,从这条曲线可以了解累积污染物与总的污染物之比相对于累积径流量与总的径流量之比的变化情况。对角线表示整个降雨过程径流中污染物均衡迁移。当 M(V) 曲线高于对角线时,则认为发生了

初始冲刷,曲线与对角线垂向距离越大则初始冲刷效应越显著。通常用携带 80% 污染物所实际发生的径流量来判断比较直观,所需的径流量越小,发生的初始冲刷效应越强烈^[15]。针对初始冲刷效应强的下垫面,在降雨初期对雨水径流进行防控则能有效控制入河污染物。

2 结果与讨论

2.1 屋面径流分析

针对五组屋面径流数据进行检验,结果见表 2。

表 2 屋面径流数据 KMO 检验和 Bartlett 检验结果
Tab. 2 KMO test and Bartlett test results of roof runoff data

有效降雨	采样点	KMO 值	Bartlett 球形度检验	sig
1	3 号	0.614	10	0
	4 号	0.652	10	0
2	3 号	0.696	10	0
	4 号	0.514	10	0
3	3 号	0.688	10	0
	4 号	0.665	10	0
4	4 号	0.467	10	0
	3 号	0.325	10	0.098
5	4 号	0.465	10	0.009

根据前述检验规则,选取 KMO 检验值>0.6 的数据进行分析。因此,选取最具有代表性的第 1 次以及第 3 次有效降雨数据进行屋面径流主成分分析,结果见表 3。

表 3 屋面径流的主成分分析结果

Tab. 3 Results of principal component analysis of roof runoff

采样点	指标	第 1 次有效降雨			第 3 次有效降雨		
		1	2	3	1	2	3
3 号屋顶	SS	0.125	0.020	0.992	-0.067	-0.108	0.990
	总磷	0.174	0.973	0.008	0.174	0.971	-0.144
	总氮	0.980	0.109	0.112	0.915	0.243	-0.104
	COD	0.783	0.477	0.130	0.896	-0.022	-0.122
	氨氮	0.997	0.105	0.079	0.929	0.214	0.066
	方差贡献率(%)	51.478	23.941	20.386	50.732	21.192	20.448
	累计贡献率(%)	51.478	75.418	95.804	50.732	71.923	92.371
4 号屋顶	SS	0.133	0.986	-0.026	-0.006	0.031	0.990
	总磷	-0.842	-0.342	0.300	0.338	0.931	0.043
	总氮	0.977	-0.008	-0.027	0.901	0.357	0.030
	COD	-0.145	-0.028	0.986	0.895	0.115	0.026
	氨氮	0.972	0.128	-0.123	0.890	0.362	-0.080
	方差贡献率(%)	52.932	22.136	21.580	50.351	22.772	20.154
	累计贡献率(%)	52.932	75.068	96.648	50.351	73.124	93.278

依据以上分析结果,对原始的屋面径流水质特征性指标进行归类,得到旋转空间成分图,见图 2 和图 3。



图 2 第一次和第三次有效降雨 3 号采样点主成分载荷值分析

Fig. 2 Analysis on the principal component load value of 3# sampling point in the first and third effective rainfall



图 3 第一次和第三次有效降雨 4 号采样点主成分载荷值分析

Fig. 3 Analysis on the principal component load value of 4# sampling point in the first and third effective rainfall

根据因子的提取要求,由以上分析结果可知,本次降水适合选用前三个公因子进行分析,因为这三个因子能够解释全部变量的 90% 以上,已足够代替原有变量。第一主成分的贡献率均在 50% 左右。与第一主成分相关的是氨氮、总氮和 COD,除第 1 次有效降雨事件 4 号采样点外,其余三个指标变化方向一致,且呈正相关,说明引起这三个指标变化的原因相似。第一主成分主要反映的是屋面径流水质主要受到氮以及有机污染物的影响,其污染源为大气干湿沉降,机动车尾气排放和屋面材料析出物。降水过程使空气污染物得到淋洗。有研究表明,在屋面径流中,降雨对氮的贡献率为 10% ~ 25%^[16]。其中,由于机动车尾气含有大量的 NO_x^[17],这些氮氧化物通过大气干湿沉降的形式下落到屋面上,可能是屋面径流中的氮含量的主要来源。由于采样点附近属于公路交叉口,车流量和人流密集,扬尘大,屋面并不清扫,老化的油毡沥青屋面能够释放出大量的有机物质^[18]。

与第二主成分密切相关的是总磷与第三主成分密切相关的是 SS,各自贡献率均在 20% 左右,这表明屋面径流水质还受总磷和 SS 的影响。由于颗粒物易成为磷的化合物的载体,因此磷的一个重要来源可能是周围的建筑工地^[19]。另外,有文献指出,在降水淋洗空气的过程会产生含磷污染物污染,但

贡献率小于 5%^[16]。由于取样点靠近高架桥,属于交通干道。机动车辆行驶过程中轮胎与路面的相互作用会产生磷酸盐等污染物^{20-22]}。因此,进入大气部分的污染物可能会经过大气干沉降以及降雨过程的空气淋洗作用形成屋面径流污染。SS 主要来源是大气干湿沉降。车辆轮胎和路面材料的摩擦,以及车辆部件磨损释放的颗粒随空气流动进入大气后,再经过降雨过程后可能形成屋面径流污染。

2.2 菜市场路面径流

对五组路面径流数据进行检验,结果见表 4。

表 4 菜市场路面径流数据 KMO 检验和 Bartlett 检验结果
Tab. 4 KMO test and Bartlett test results of grocery market runoff data

有效降雨	采样点	KMO 值	Bartlett 球形度检验	sig
1	1 号	0.543	10	0
	2 号	0.601	10	0
2	1 号	-	-	-
	2 号	-	-	-
3	1 号	0.746	10	0
	2 号	0.793	10	0
4	1 号	0.674	10	0.002
	2 号	0.676	10	0
5	1 号	0.714	10	0
	2 号	0.83	10	0

注:由于第二次降雨 1 号、2 号采样点采样个数少,未计算其相关检验结果。

根据前述检验规则,选取 KMO 检验值 > 0.7 的代表性更强的数据进行分析。因此,选取的数据来自第 3 次以及第 5 次有效降雨。针对路面径流数据进行主成分分析结果如表 5 所示。

继续依据以上分析结果,对原始的屋面径流水质特征性指标进行归类,得到旋转空间成分图,见图 4 和图 5。

根据因子的提取要求,有以上分析结果可知,本次降水适合选用前两个公因子进行分析,因为这两个因子能够解释全部变量的 95% 以上,已足够代替原来的变量。纵观四次菜市场路面径流数据的主成分分析结果,第一主成分的方差贡献率在 50% 左右,与第一主成分相关的是 SS、总磷和 COD。第一主成分主要反映的是路面径流水质主要受到 SS、磷和有机污染物的污染。从总体上来看,三个指标变化方向一致,呈正相关,说明二者的来源相似。其中,SS 与第一主成分关系密切,总磷和 COD 与第一主成分关系次之。其污染源为机动车损耗以及生活污染。有研究认为 SS 是公路径流的主要污染物²³⁻²⁶,SS 主要来源是车辆轮胎和路面材料的相互

表 5 菜市场路面径流的主成分分析结果

Tab. 5 Results of principal component analysis of grocery market road surface runoff

采样点	指标	第 3 次有效降雨		第 5 次有效降雨	
		成分			
		1	2	1	2
1 号路面	SS	0.977	0.131	0.925	0.292
	总磷	0.623	0.514	0.881	0.463
	总氮	0.337	0.919	0.689	0.715
	COD	0.825	0.666	0.878	0.424
	氨氮	0.168	0.963	0.327	0.942
	方差贡献率(%)	49.938	43.291	59.710	37.572
累计贡献率(%)		49.938	93.230	59.710	97.283
2 号路面	SS	0.862	0.505	0.935	0.323
	总磷	0.604	0.795	0.809	0.576
	总氮	0.515	0.848	0.343	0.907
	COD	0.646	0.757	0.805	0.508
	氨氮	0.484	0.872	0.508	0.800
	方差贡献率(%)	58.778	40.491	52.526	43.132
累计贡献率(%)		58.778	99.270	52.526	95.658

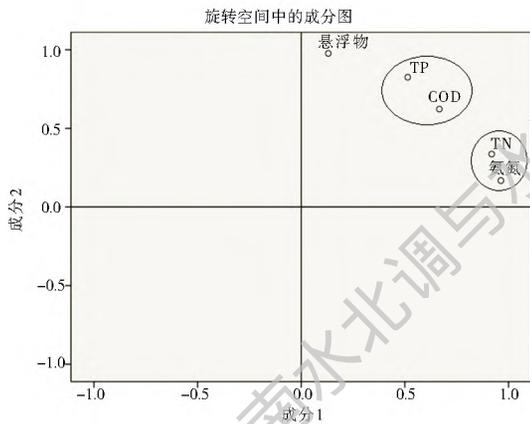


图 4 第三次和第五次有效降雨 1 号采样点主成分载荷值分析

Fig. 4 Analysis on the principal component load value of 1# sampling point in the third and fifth effective rain fall

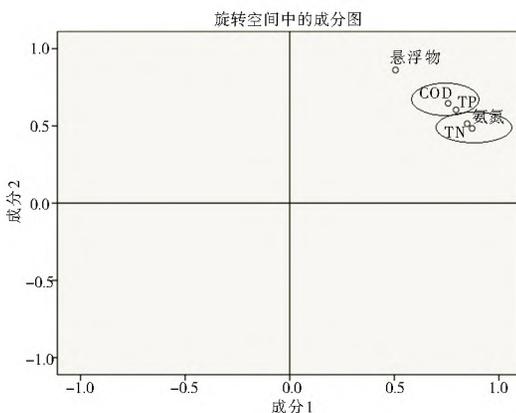
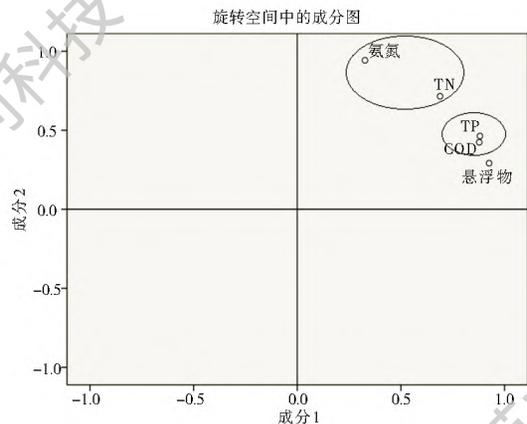


图 5 第三次和第五次有效降雨 2 号采样点主成分载荷值分析

Fig. 5 Analysis on the principal component load value of 2# sampling point in the third and fifth effective rain fall

作用,以及车辆部件磨损释放的颗粒;由于采样点位于菜市场,靠近居民区,居民烟囱释放出的烟尘也可能会有较大贡献率。由于城市居民日常生活产生的生活垃圾含有大量好氧物质,其中 COD 污染也是街道径流污染的主要因素之一。黄金良^[27]等发现车辆轮胎的损耗是道路降雨径流中有机物质的主要来源。磷的来源,一方面来自降水的空气淋洗作用,有研究表明道路径流中此部分污染作用贡献率 13%^[16];一方面来自生活垃圾。

第二主成分贡献率为 40% 左右,与第二主成分相关的是氨氮和总氮。两个指标变化方向一致,呈正相关,说明二者的来源相似。其污染源为大气沉降以及机动车尾气排放^[28]。有研究表明,地表径流中氮素污染物来自雨水的比例很高^[29]。依据采样点的环境特点,食用蔬菜类上的残留化肥也可能是导致该地区氮污染较高的原因之一。

2.3 不同下垫面降雨径流污染初始冲刷效应分析

2.3.1 屋面径流污染初始冲刷效应

屋面降雨 $M(V)$ 曲线如图 6、图 7 所示。在第一次和第三次有效降雨事件中,各污染物发生了不同程度的初始冲刷效应。第一次有效降雨的 3 号采样点,

COD、氨氮和总氮发生了初始冲刷效应,分别有 56%、39% 和 40% 的径流量携带了各自 80% 的污染负荷,总磷和 SS 未发生初始冲刷;第一次有效降雨的 4 号采样点,氨氮、总氮和 SS 发生了初始冲刷效应,但总氮和 SS 的初始冲刷效应较氨氮的弱,其携带 80% 的污染负荷所对应的径流量分别为 40%、70% 和 69%。第三次有效降雨的 3 号采样点,除 SS 外的其余污染物均呈现在降雨初期呈现初始冲刷效应,而在降雨后期曲线移动至平衡线下方,降雨径流对各污染物的冲刷效果不明显,污染源呈现衰减和耗竭现象。第三次有效降雨的 4 号采样点,除 SS 外各项污染指标均出现了不同程度的初始冲刷效应。

2.3.2 菜市场路面径流污染初始冲刷效应

菜市场路面降雨径流 $M(V)$ 曲线如图 8、图 9 所示。纵观两场有效降雨的两个菜市场路面采样点(1 号和 2 号),各污染物均呈现出初始冲刷现象,并且在降雨后期,各曲线并未移动到平衡线下方,说明各污染源并未出现衰减和耗竭现象。第一次有效降雨的 1 号采样点,COD、氨氮、总氮、总磷和 SS 分别有 32%、20%、28%、72% 和 70% 的径流量携带各自的 80% 负荷;第一次有效降雨 2 号采样点,COD、氨氮、总氮、总磷和 SS 携带 80% 负荷所对应的径流量

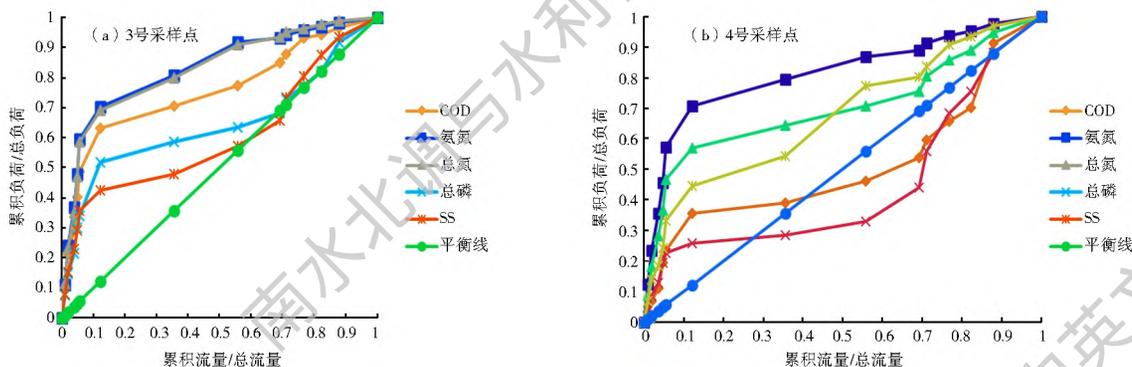


图 6 第一次有效降雨 3 号和 4 号采样点初始冲刷

Fig. 6 First flush effect of 3# and 4# sampling points in the first effective rainfall

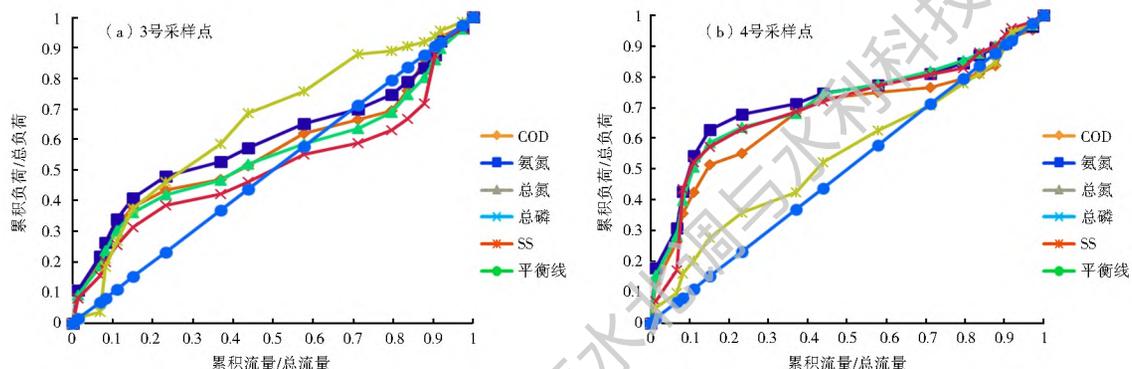


图 7 第三次有效降雨 3 号和 4 号采样点初始冲刷

Fig. 7 First flush effect of 3# and 4# sampling points in the third effective rainfall

分别为60%、28%、52%、69%和72%。第三次有效降雨的1号采样点,COD、氨氮、总氮、总磷和SS分别有53%、61%、62%、64%和63%的径流量携带各

自的80%负荷;第三次有效降雨2号采样点,COD、氨氮、总氮、总磷和SS携带80%负荷所对应的径流量分别为56%、49%、69%、64%和56%。

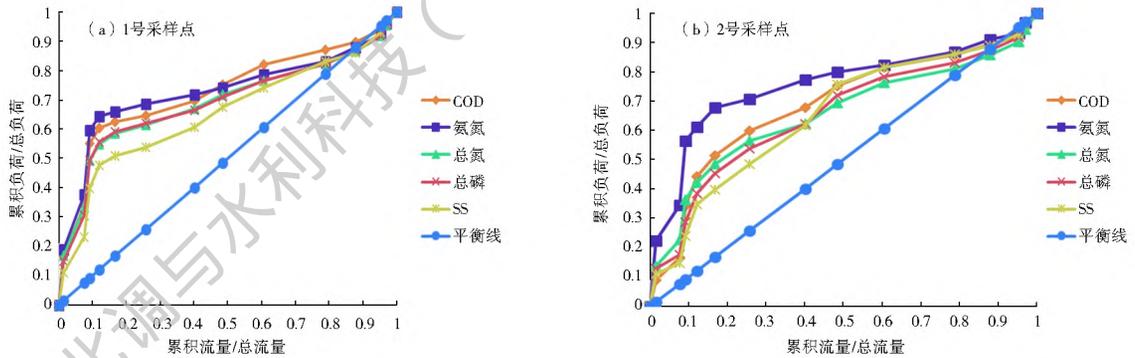


图8 第一次有效降雨1号和2号采样点初始冲刷
Fig. 8 First flush effect of 1# and 2# sampling points in the first effective rainfall

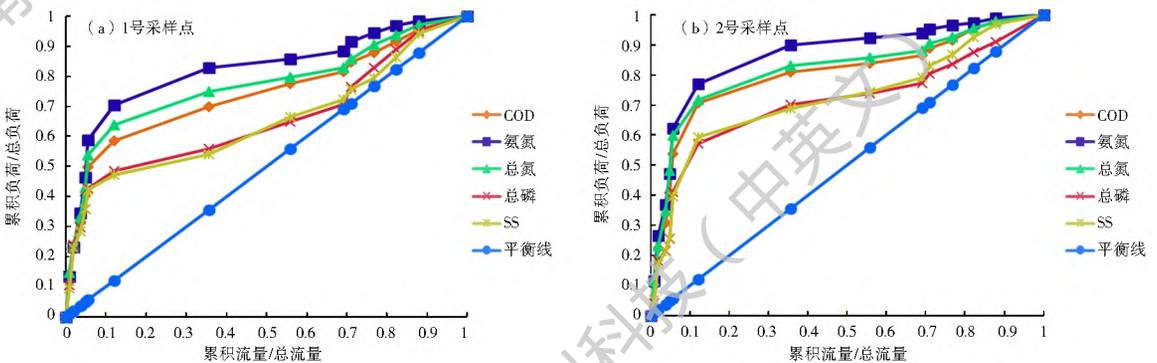


图9 第三次有效降雨1号和2号采样点初始冲刷
Fig. 9 First flush effect of 1# and 2# sampling points in the third effective rainfall

3 结论

(1)在屋面径流中,氨氮、总氮和COD密切相关;而在菜市场路面径流中,氨氮与总氮相关性强,COD与总磷密切相关。

(2)屋面径流第一类主要污染源为与氨氮、总氮和COD有关的机动车尾气,大气干湿沉降和屋面析出物;第二类主要污染源与总磷和SS有关的建筑工地污染以及机动车损耗。菜市场路面径流第一类主要污染源为与SS、COD和总磷有关的机动车损耗以及生活污染;第二类主要污染源为与氨氮和总氮有关的大气干湿沉降以及机动车尾气。

(3)屋面径流与路面径流污染物均存在不同程度的初始冲刷效应,氨氮在几次降雨过程的初始冲刷效应均较为显著。并且在降雨过程的中后期,各污染物曲线有偏离平衡线的趋势,说明有同步的污染源输入。天津市菜市场路面径流比屋面径流更易于形成初始冲刷效应,对路面径流的初期雨水进行防控,特别是针对氨氮的削减,能有效减少入河污染物浓度。

参考文献(References):

- [1] 汉京超. 城市雨水径流污染特征及排水系统模拟优化研究[D]. 上海: 复旦大学, 2013. (HAN J C. Characteristics of urban rainwater runoff pollution and simulation & optimization of discharge systems[D]. Shanghai: Fudan University, 2013. (in Chinese))
- [2] LI YINGXIA, MA JUNHU A, YANG ZHIFENG, et al. Influence of non point source pollution on water quality of Wetland Baiyangdian, China[J]. Desalination and Water Treatment, 2011, 32: 291-296. DOI: 10.5004/dwt.2011.2713.
- [3] ALLEN P. DAVIS, MOHAMMAD SHOKOUHIAN, SHU BEI NI. Loading estimates of lead, copper, cadmium, and zinc in urban runoff from specific sources[J]. Chemosphere, 2001, 44(5): 997-1009. DOI: 10.1016/S0045-6535(00)00561-0.
- [4] 张千千, 李向全, 王效科, 等. 城市路面降雨径流污染特征及源解析的研究进展[J]. 生态环境学报, 2014, 23(2): 352-358. (ZHANG Q Q, LI X Q, WANG X K, et al. Research advance in the characterization and source apportionment of pollutants in urban roadway runoff[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2014, 23(2): 352-358. (in Chinese)) DOI: 10.16258/j.cnki.1674-5906.2014.02.020.
- [5] BU DDHI WIJESIRI, PRASANNA EGODAWATTA, JAMES

- MCGREEC et. al. Influence of pollutant build up on variability in wash off from urban road surfaces[J]. Science of the Total Environment, 2015, 527-528: 344-350. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2015.04.093.
- [6] 陈淑芬, 刘连江, 张茜雯, 等. 济南城区不同下垫面雨水径流水质变化规律研究[J]. 山东建筑大学学报, 2012, 27(1): 80-83. (CHEN S F, LIU L J, ZHANG Q W, et al. Research on charging rules of storm runoff water quality in different underlying surface Jinan urban area[J]. Journal of Shandong jianzhu University, 2012: 27(1): 80-83. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1673-7644.2012.01.020.
- [7] 黄国如, 聂铁锋. 广州城区雨水径流非点源污染特性及污染负荷[J]. 华南理工大学学报(自然科学版), 2012, 40(2): 142-148. (HUANG G R, NIE T F. Characteristics and load of non-point source pollution of urban rainfall runoff in Guangzhou, China[J]. Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition), 2012, 40(2): 142-148. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1000-565X.2012.02.025.
- [8] 张千千, 王效科, 郝丽岭, 等. 重庆市路面降雨径流特征及污染源解析[J]. 环境科学, 2012, 33(1): 76-82. (ZHANG Q Q, WANG X K, HAO L L, et al. Characterization and source apportionment of pollutants in urban roadway runoff in Chongqing[J]. Environment Science, 2012, 33(1): 76-82. (in Chinese)) DOI: 10.13227/j.hj.kx.2012.01.026.
- [9] 张淑娜, 李小娟. 天津市区道路地表径流污染特征研究[J]. 环境科学与管理, 2008, 33(2): 25-28. (ZHANG S N, LI X J. Pollution feature of road surface runoff in urban district of Tianjin[J]. Environmental Science and Management, 2008, 33(2): 25-28. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1002-6002.2008.03.017.
- [10] 张杏娟, 程方, 王秀朵. 天津平顶沥青屋面径流雨水污染特征分析[J]. 天津城市建设学院学报, 2011, 17(3): 212-215. (ZHANG X J, CHENG F, WANG X D. Feature analysis on pollution of urban asphalt flat roof runoff in Tianjin[J]. Journal of Tianjin Institute of Urban Construction, 2011, 17(3): 212-215. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1006-6853.2011.03.015.
- [11] 张娜, 赵乐军, 李铁龙, 等. 天津城区道路雨水径流水质监测及污染特征分析[J]. 生态环境学报, 2009, 18(6): 2127-2131. (ZHANG N, ZHAO L J, LI Tielong, Characteristics of pollution and monitoring of water quality in Tianjin[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2009, 18(6): 2127-2131. (in Chinese)) DOI: 10.16258/j.cnki.1674-5906.2009.06.020.
- [12] 欧阳威, 王玮, 郝芳华. 北京城区不同下垫面降雨径流产污特征分析[J]. 中国环境科学, 2010, 30(9): 1249-1256. (OUYANG W, WANG W, HAO F H. Pollution characterization of urban stormwater runoff on different underlying surface conditions[J]. China Environmental Science, 2010, 30(9): 1249-1256. (in Chinese))
- [13] 刘臣辉, 吕信红, 范海燕. 主成分分析法用于环境质量评价的探讨[J]. 环境科学与管理, 2011, 36(3): 183-186. (LIU C H, LV X H, FAN H Y. Study of applying principal component analysis to environmental quality assessment[J]. Environmental Science and Management, 2011, 36(3): 183-186. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1673-1212.2011.03.045.
- [14] MASAHIRO KURODA, YUICHI MORI, MASAYA IZUKA, et al. Acceleration of the alternating least squares algorithm for principal components analysis[J]. Computational Statistics and Data Analysis, 2011, 55(1): 143-153. DOI: 10.1016/j.csda.2010.06.001.
- [15] 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[J]. 环境科学, 2013, 34(1): 373-378. (REN Y F, WANG X K, OUYANG Z Y, et al. Analysis of first flush effect of typical underlying surface runoff in Beijing Urban City[J]. Environmental Science, 2013, 34(1): 373-378. (in Chinese)) DOI: 10.13227/j.hj.kx.2013.01.046.
- [16] 沈君. 武汉市屋面雨水水质特性分析[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2009. (SHEN J. Analysis on water quality of runoff from roof in Wuhan[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2009. (in Chinese)) DOI: 10.7666/d.y1474368.
- [17] 姚志良, 张明辉, 王新彤, 等. 中国典型城市机动车排放演变趋势[J]. 中国环境科学, 2012, 32(9): 1565-1573. (YAO Z L, ZHANG M H, WANG X T, et al. Trends in vehicular emissions in typical cities in China[J]. China Environmental Science, 2012, 32(9): 1565-1573. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1000-6923.2012.09.005.
- [18] 杨龙, 孙长虹, 王旭, 等. 不同屋面类型径流污染特征研究[J]. 环境科学与管理, 2014, 39(12): 34-67. (YANG L, SUN C H, WANG X, et al. Study on runoff pollution characteristics of different roof types[J]. Environmental Science and Management, 2014, 39(12): 34-67. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1673-1212.2014.12.008.
- [19] 聂发辉, 向速林, 王全金, 等. 城市高架公路雨水径流的污染特征[J]. 生态环境学报, 2012, 21(5): 924-928. (NIE F H, XIANG S L, WANG Q J, et al. Characterization of pollutants in urban overhead road[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2012, 21(5): 924-928. (in Chinese)) DOI: 10.16258/j.cnki.1674-5906.2012.05.030.
- [20] 李春林, 胡远满, 刘淼, 等. 城市非点源污染研究进展[J]. 生态学杂志, 2013, 32(3): 492-500. (LI C L, HU Y M, LIU M, et al. Urban non-point source pollution: research progress[J]. Chinese Journal of Ecology, 2013, 32(3): 492-500. (in Chinese)) DOI: 10.13292/j.1000-4890.2013.0132.
- [21] 余爱华, 石迪, 赵尘. 公路沥青路面径流的水质特性[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2008, 32(5): 149-152. (YU A H, SHI D, ZHAO C. Water characteristics of highway asphalt pavement runoff[J]. Journal of Nanjing Forestry University (Natural Sciences Edition), 2008, 32(5): 149-152. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1000-2006.2008.05.033.
- [22] 任玉芬, 王效科, 欧阳志云, 等. 北京城区道路沉积物污染特性[J]. 生态学报, 2013, 33(8): 2365-2371. (REN Y F, WANG X K, OUYANG Z Y, et al. The pollution characteristics of Beijing urban road sediments[J]. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(8): 2365-2371. (in Chinese)) DOI: 10.5846/stxb201209201326.

(下转第 101 页)

- (DENG C X, JIN J L, WANG Z Z, et al. Fuzzy four element connection number based security evaluation model for flood control engineering system[J]. Journal of Catastrophology, 2008, 23(3): 41-43. (in Chinese) DOI: 10.3969/j.issn.1000-811X.2008.03.010.
- [46] 刘双跃, 王娟, 何发龙. 四元联系数对煤矿安全质量标准化的优化研究[J]. 中国安全生产科学技术, 2012, 8(12): 32-37. (LIU S Y, WANG J, HE F L. Optimization research of coal mine safety quality standardization based on four element connection number model[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2012, 8(12): 32-37. (in Chinese))
- [47] 叶义城, 柯丽华, 黄德育. 系统综合评价技术及其应用[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2006. (YE Y C, KE L H, HUANG D Y. System comprehensive evaluation technology and its application[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2006. (in Chinese))
- [48] 刘科峰. 合肥城区典型景观水体水环境变化特征及评价[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2014. (LIU K F. Variation Characteristics and evaluations of water environment in typical landscape waters in Hefei City[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2014. (in Chinese))
- [49] 李文宾, 姚阿漫. 基于熵权的五元联系数在地下水水质评价中的应用[J]. 水资源与水工程学报, 2013, 24(2): 118-120. (LI W B, YAO A M. Application of five element connection number in evaluation of groundwater quality based on entropy[J]. Journal of Water Resources & Water Engineering, 2013, 24(2): 118-120. (in Chinese))
- [50] 高军省. 湖泊富营养化综合评价的五元联系数法[J]. 人民长江, 2010, 41(21): 81-84. (GAO J S. Method of five element connection number for Lake Eutrophication assessment[J]. Yangtze River, 2010, 41(21): 81-84. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1001-4179.2010.21.023.
- [51] 陆洲, 马涛. 地下水环境质量评价的一种新方法——集对分析法[J]. 环境保护科学, 2005, 31(5): 53-55. (LU Z, MA T. A new method to assess the environmental quality of underground water-set pair analysis[J]. Environmental Protection Science, 2005, 31(5): 53-55. (in Chinese)) DOI: 10.16803/j.cnki.issn.1004-6216.2005.05.018.
- [52] 李焱, 姚佳. 基于熵权五元联系数在实验室安全管理评价中的应用[J]. 实验室研究与探索, 2015, 34(9): 285-288. (LI H, YAO J. Application of five element connection number in evaluation of university laboratory safety management based on entropy[J]. Research and Exploration in Laboratory, 2015, 34(9): 285-288. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1006-7167.2015.09.070.

(上接第92页)

- [23] 邓鑫楠, 张慧, 吴湘滨. 高速公路路面径流及路侧水质污染研究[J]. 西部交通科技, 2007, (2): 7-9. (DENG X N, ZHANG H, WU X B. Study on the pollution in expressway pavement runoff and the roadside water quality[J]. Projects of Western China, 2007, (2): 7-9. (in Chinese) DOI: 10.13282/j.cnki.wccst.2007.02.003.
- [24] 唐荣, 钱国平, 秦志斌, 等. 路面径流污染成因与特征的研究进展[J]. 环境科学与技术, 2010, 33(12F): 425-429. (TANG R, QIAN G P, QIN Z B, et al. Research progress of pavement runoff pollution causes and characteristics[J]. Environmental Science and Technology, 2010, 33(12F): 425-429. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1003-6504.2010.12F.112.
- [25] 李春林, 刘淼, 胡远满, 等. 沈阳市降雨径流污染物排放特征[J]. 生态学杂志, 2014, 33(5): 1327-1336. (LI C L, LIU M, HU Y M, et al. Characteristics of pollutants in urban rainfall runoff in Shenyang City[J]. Chinese Journal of Ecology, 2014, 33(5): 1327-1336. (in Chinese) DOI: 10.13292/j.1000-4890.20140327.031.
- [26] 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[J]. 环境科学, 2012, 33(1): 71-75. (HOU P Q, REN Y F, WANG X K, et al. Research on evaluation of water quality of Beijing urban stormwater runoff[J]. Environmental Science, 2012, 33(1): 71-75. (in Chinese)) DOI: 10.13227/j.hjks.2012.01.025.
- [27] 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 J L, DU P F, OU Z D, et al. Characterization of urban surface runoff in two urban catchments in Macau[J]. Environmental Science, 2006, 27(9): 1753-1759. (in Chinese)) DOI: 10.13227/j.hjks.2006.09.010.
- [28] 叶颖, 徐沛斌, 翟云波, 等. 高速公路关键地段路面径流污染特征研究[J]. 环境科学与技术, 2013, 36(6): 134-137. (YE Y, XU P B, ZHAI Y B, et al. Characterization of highway runoff pollution[J]. Environmental Science and Technology, 2013, 36(6): 134-137. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1003-6504.2013.06.026.
- [29] 唐莉华, 何康茂, 梁宁, 等. 北京校园区降雨径流产污特性及其对水环境的影响[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2014, 54(8): 1025-1030. (TANG L H, HE K M, LIANG N, et al. Urban rainfall runoff pollution on the campus in Beijing and its impact on water body[J]. Journal of Tsinghua University (Natural Science Edition), 2014, 54(8): 1025-1030. (in Chinese)) DOI: 10.16511/j.cnki.qhdxb.2014.08.008.