

于海霞,于江华,徐礼强,等.2013.韩国西海岸地区停车场径流携带沉积物的粒径分布及污染特征研究[J].环境科学学报,33(4):1066-1072
Yu H X, Yu J H, Xu L Q, et al. 2013. Characteristics of particle size distribution and pollutants content of sediments in parking lots runoff in the coastal area of Korea[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 33(4):1066-1072

韩国西海岸地区停车场径流携带沉积物的粒径分布及污染特征研究

于海霞¹,于江华^{2,*},徐礼强³,金永喆⁴

1. 中山大学 地理科学与规划学院,广东省城市化与地理环境空间模拟重点实验室,广州 510275
2. 南京信息工程大学 环境科学与工程学院,江苏省大气环境监测与污染控制高新技术研究重点实验室,南京 210044
3. 珠江水利委员会珠江水利科学研究所,广州 510611
4. 韩国韩瑞大学 环境工程系,瑞山 356706

收稿日期:2012-06-27 修回日期:2012-09-28 录用日期:2012-10-16

摘要:为了解沿海地区城市停车场内径流携带沉积物的粒径分布及污染特征,于2011年4—6月在韩国西海岸12个不同停车场采集了沉积物样品,分别分析了其粒径分布和各粒径中污染物质的含量.结果表明,不同采样点的废弃物形态差异较大,主要表现在较大的植物茎叶、烟蒂及动物粪便等废弃物和含水率等方面.不同采样点的颗粒物粒径大小不同,其颗粒物的均一性也有所差异.总体来讲,106~500 μm之间的颗粒物是径流携带沉积物的主要组成部分,其平均质量分数占总体(<2360 μm)颗粒物的59.9%.对不同粒径中污染物质的含量分析得出,颗粒物中污染物质的含量随粒径增大而减小.其中,<106 μm的颗粒物中总氮、总磷、COD和挥发性物质的质量分别占各污染物总量的18.9%、17.8%、20.41%和18.9%,而该部分颗粒物本身的平均质量分数只有3.9%.可见<106 μm的颗粒物处于高度污染状态.因此,在城市停车场面源污染管理中,应该对该部分高度污染的颗粒物给以足够的重视.对于不同污染特征的颗粒物应该采用不同的去除方法.

关键词:城市停车场;径流沉积物;粒径分布;污染特征

文章编号:0253-2468(2013)04-1066-07 中图分类号:X522 文献标识码:A

Characteristics of particle size distribution and pollutants content of sediments in parking lots runoff in the coastal area of Korea

YU Haixia¹, YU Jianghua^{2,*}, XU Liqiang³, KIM Younghul⁴

1. Guangdong Key Laboratory for Urbanization and Geo-simulation, School of Geography and Planning, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275
2. School of Environmental Science and Engineering, Jiangsu Key Laboratory of Atmospheric Environment Monitoring & Pollution Control, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044
3. Pearl River Hydraulic Research Institute of PRWRC, Guangzhou 510611
4. Department of Environmental Engineering, Hanseo University, Seosan 356706

Received 27 June 2012; received in revised form 28 September 2012; accepted 16 October 2012

Abstract: Road-deposit sediment samples were collected from twelve parking lots in the urban coastal area of Korea during April-June of 2004. The particle size distribution and concentrations of pollutants including total nitrogen, total phosphorus, chemical oxygen demand and volatile solids were analyzed. The sediments collected from different parking lots were distinct from each other and typically included contents of branches, cigarette-ends, animal wastes and water constituents. The particle size distribution and uniformity also differed from site to site. Particles in the range of 106~500 μm contributed to a large portion of the sediments with a mass fraction of 59.9%. Compared with larger particles, the smaller particles were determined as highly polluted. Around 18.9% of total nitrogen, 17.8% of total phosphorus, 20.41% of chemical oxygen demand and 18.9% of volatile solids were associated with particles less than 106 μm, which accounted for only 3.9% of the total solids. Thus, more attention should be paid to these particles in managing non-point source pollution in parking lots. In addition, different methods should be employed for the treatment of particles with different sizes.

基金项目:中央高校基本科研业务费专项资金(No. 111gpy100);国家自然科学基金(No. 51009156,51002196);南京信息工程大学科研基金(No. 2012X050)

Supported by the Fundamental Research Funds for the Central Universities (No. 111gpy100), the National Natural Science Foundation of China (No. 51009156,51002196) and the Scientific Research Foundation of Nanjing University of Information Science and Technology (No. 2012X050)

作者简介:于海霞(1976—),女,博士,E-mail:yuhaixia@mail.sysu.edu.cn; *通讯作者(责任作者),E-mail:yujh@nuist.edu.cn

Biography: YU Haixia (1976—), female, Ph. D., E-mail:yuhaixia@mail.sysu.edu.cn; *Corresponding author, E-mail:yujh@nuist.edu.cn

Keywords: urban parking lots; sediments in runoff; particle size distribution; pollutants contents

1 引言 (Introduction)

近年来,城市点源污染逐渐得到全面控制,然而城市环境质量并未得因此到本质改善(王书敏等,2011).不断加快的城市化进程使得非点源污染成为城市环境恶化的主要原因(张科峰等,2012).城市地表径流是典型的非点源污染源,具有地域范围广、随机性强、成因复杂等特点,目前非点源污染已成为水环境污染的重要因素(尹炜等,2005).伴随着城市化进程的加快,在城市和城郊地区的不透水区域(屋顶、街道及停车场等)表面积不断增加,这些表面上附集着很多不同种类的污染物.在降水过程中该类污染物质随地表径流进入受纳水体,从而引起水体污染(张蕾等,2010).城市地表沉积物是城市地表径流中的污染物的主要来源,且其组成决定着城市地表径流污染的性质.城市停车场径流中沉积物作为一种重要的非点源污染源,逐渐受到人们的高度重视.研究发现,该类沉积物中包含的污染物质主要有重金属、营养盐、有机质等(Yu *et al.*, 2010).这些污染物质会引起严重的环境问题,其对环境的影响具有季节性、瞬时性和迁延性等特点,且影响程度受到多重因素的影响,包括停车场容量、下垫面材质、周边土地利用类型、停车场的管理与维护情况等,还包括降雨条件,如降雨强度、降雨量及两次降雨之间的时间间隔等.同时,城市径流沉积物的环境危害在很大程度上受沉积物的粒径分布的影响(Murakami *et al.*, 2005; Kim *et al.*, 2008).

针对降雨径流携带沉积物的粒径分布研究国内外已有很多报道,例如,Sartor 等(1974)测量了城市径流沉积物的粒径分布,结果表明,直径在 246 μm 以下的颗粒物大约占总颗粒物的 43% (质量分数);Zanders 等(2005) 研究发现,粒径小于 100 μm 的小颗粒物,其污染物质的含量明显高于大颗粒物.同时,有研究报道,污染物质通常积聚于不同颗粒大小的沉积物中(朱伟等,2008).沉积物的迁移性和粒径分布密切相关,而粒径大小与其物理、化学性质和环境行为息息相关(叶友斌等,2009).粒径大小不同,污染物质迁移、转化的量和形态就不同.不同粒径的沉积物影响着径流中所发生的物理和化学变化过程,是污染迁移转化的指示灯(Furumai *et al.*, 2002;朱伟等,2008).

因此,在对城市径流沉积物进行管理及控制的过程中,有必要对沉积物的粒径分布及污染特征进行研究,以便为对该类污染物质进行有效管理提供参考.然而目前已有的研究大部分局限于单一的研究区域,对较大范围的调查研究不多.基于此,本文对韩国西海岸 12 个停车场径流携带的沉积物进行研究,分析比较韩国西海岸地区城市停车场径流沉积物的粒径分布特征,并确定不同粒径沉积物中化学需氧量、总氮、总磷及挥发性有机物质的含量分布特点,进而得出污染物质含量与粒径大小的数量关系.以为城市非点源污染管理及管理技术的选择提供数据支持.

2 材料与方法 (Materials and methods)

2011 年 4—6 月,对韩国西海岸 12 个停车场的径流沉积物进行了调查,采样点分布见图 1. 采样点的选择依据主要为:①所选择停车场为沿岸地区人流较多的海水浴场或其它旅游景点停车场,其下垫面材质或为沥青或为水泥;②从停车场面积来看,所选采样点应覆盖面积不同的各种停车场,文中各采样点停车场面积在 400 ~ 60000 m^2 之间;③所选停车场周围的土地利用应尽可能代表海岸城市基本土地利用情况,例如,海水浴场、商业带、居住区、绿化带/林带等,每种类型设置采样点 2 ~ 4 个,具体

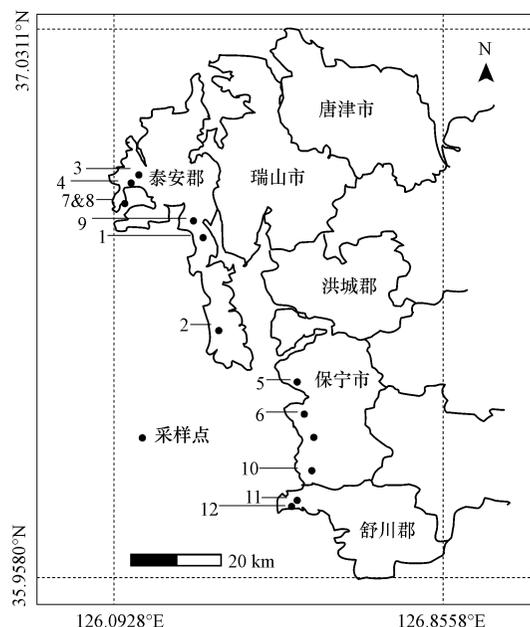


图 1 采样地点分布

Fig. 1 Distribution of sampling sites in this study

情况见表 1. 从采样点位置来看, 采样点 2、4、7、9 位于停车场的内部, 其余采样点位于停车场周边. 采样点位置的不同可能会导致所采集沉积物样品的来源不同. 对于停车场内部采样点, 沉积物一般来自于停车场, 而位于停车场周边的采样点, 其部分沉积物样品可能来自停车场外区域. 采样点的数量和分布在一定程度上可以代表整个沿海地区城市

停车场径流沉积物的特征. 沉积物样品采集于停车场内部排水沟. 对于沉积物深度大于 10 cm 的样点, 取表层 10 cm 样品, 小于 10 cm 的样点取整体深度样品, 每个采样点设置 6 个平行样品, 以期在最大程度上消除因样品采集带来的误差. 每个样品约取 5 kg 混合后带回实验室.

表 1 各停车场具体情况及采样情况

Table 1 Information on the studied parking lots and sampling

采样点	采样日期	面积 /m ²	材质	容量 / (辆 100m ⁻²)	采样点位置	周边土地利用	沉积物深度 /cm
1	2011-04-06	7609	水泥	5.3	b	商业区/林带	24
2	2011-04-06	60168	沥青	1.6	a	海水浴场	27
3	2011-04-15	7606	沥青	3.7	b	海水浴场	18
4	2011-04-15	5620	沥青	1.8	a	海水浴场	10
5	2011-04-29	3855	沥青	4.6	b	海水浴场	5
6	2011-04-29	12000	沥青	7.1	b	海水浴场	12
7	2011-05-04	5790	沥青	2.7	a	海水浴场	24
8	2011-05-05	9239	水泥	3.8	b	居住区/绿化带	7
9	2011-05-06	1463	沥青	5.1	a	商业居住区	11
10	2011-05-18	1700	沥青	3.2	b	商业居住区	40
11	2011-06-03	9300	沥青	3.9	b	居住区/林带	5
12	2011-06-05	400	沥青	12	b	商业居住区	5

注: a 表示停车场内部排水道, b 表示停车场周边排水道.

所有样品在自然条件下风干, 将塑料、树枝、烟蒂及其它较大的废弃物剔除. 根据乌登-温特沃思 (Udden-Wentworth) 粒度分级标准 (张正偲等, 2011), 用孔径为 63、106、355、500、850 和 2360 μm 的不锈钢粒筛将其分为不同粒级; 然后将分级后的样品在 105 $^{\circ}\text{C}$ 条件下烘干 24 h, 供污染物质含量分析用. 可挥发性颗粒物 (VS) 的含量采用样品在 550 $^{\circ}\text{C}$ 烘干前后的质量差确定. COD 的分析方法为重铬酸钾法, 总氮采用过硫酸钾氧化-紫外分光光度法测定, 总磷的确定采用钼酸铵分光光度法 (APHA, 1995). 沉积物粒径分布图采用 Sigmaplot 7.0 绘制, 数据回归分析及统计分析采用 Excel 与 SPASS 11.0.

3 结果与讨论 (Results and discussion)

3.1 样品形态特征

地表径流中的悬浮颗粒物中, 大颗粒物质为植物茎叶、烟蒂及动物粪便等, 小颗粒物质包括草坪使用的化肥、农药及车辆磨损垃圾等. 具有不同土地使用功能的城市地表, 其废弃物的组成和来源

不同 (赵剑强, 2002). 本文中不同采样点的废弃物在形态上存在较大差异, 具体表现在以下几个方面: 首先, 树枝、树叶及塑料等较大废弃物的含量不同, 如在采样点 1、3 和 11 中树枝树叶等杂物含量较多, 其质量分数分别达到 8.1%、9.2% 和 11.5%, 采样点 8 中塑料及烟蒂、树枝等废弃物含量较大, 其质量分数达到了 15.2%. 其次, 沉积物中砂质不同, 其中, 距离海边较近的采样点的砂质为白砂且细小, 如采样点 2 和 3; 距离海边较远的采样点, 砂质多为泥沙且颜色暗黑, 比较典型的为采样点 6 和 12. 再次, 不同采样点由于其管道设置的不同, 导致其含水率不同, 如采样点 9 的含水率较高, 达到了 25%, 而其它样品的含水率均在 10% 以下. 这些形态上的不同可能会导致其在粒径分布及污染物质含量方面有所差异.

3.2 粒径分布特征

从地球化学和水力学两个方面来看, > 2000 μm 的颗粒物对城市系统中吸附污染物质的传输作用很小 (Adachi *et al.*, 2005), 且较大废弃物在取样过程中存在较大的随机性及在分析过程中的不确

定性. 因此, 本文对沉积物的粒径分布及污染物质含量进行分析, 仅限于粒径在 2360 μm 以下的颗粒

物. 粒径分析结果如图 2 所示.

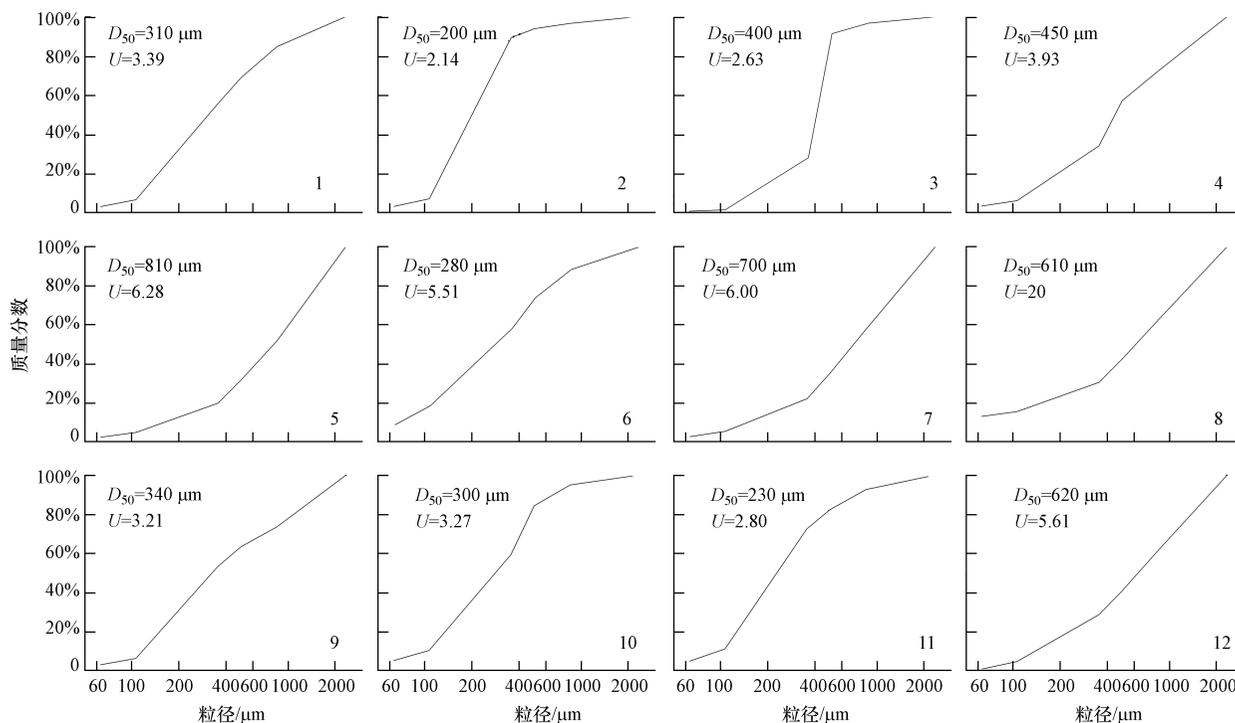


图 2 不同采样点沉积物的粒径分布特征

Fig. 2 Particle size distribution of the studied sediments

首先, 不同采样点沉积物的粒径大小有所差异, 其中 D_{50} (质量分数占总颗粒物质量 50% 时的颗粒物粒径大小) 在 200 ~ 810 μm 范围之间, 平均为 438 μm . 本文中颗粒物粒径大小的这种空间差异主要是由采样点与海边距离及车流量大小引起的. 而且各采样点沉积物的均等系数 (U) 也有所差异, 其中, 样品 5、6、7、8 和 12 的均等系数大于 5, 表明该部分样品粒径分布不均一, 尤其是样品 8, 均等系数达到了 20. 样品 8 在形态上与其它样品差异较大, 其中, 细颗粒含量较少. 其余样品均等系数均小于 5, 表明粒径分布均一.

其次, 从颗粒物的粒径分布来看, 小于 106 μm 的颗粒物所占质量分数很小, 平均为 3.9%. 大部分颗粒物分布在 106 ~ 500 μm 之间, 该部分颗粒物在总体颗粒物 (<2360 μm) 中所占的质量分数平均为 59.9%, 而在 500 ~ 2360 μm 之间的颗粒物在总体中所占的体积分数平均为 36.2%. 由此可见, 降雨时主要是 <500 μm 的颗粒物进入地表径流. 在空间差异方面, 采样点 3 ~ 7 的沉积物中小于 106 μm 的颗粒物所占的质量分数较小, 均在 3.0% 以下. 这种差异主要是由下垫面材质、停车场周围地表功能区

的不同等原因引起的 (张蕾等, 2010). 本文中, 采样点 3 ~ 7 的周边土地功能主要为海水浴场 (表 1). 采样点 8 和 11 的沉积物中小于 106 μm 的颗粒物所占的质量分数较大, 分别为 9.7% 和 6.2%. 这可能与该采样点周围的绿化带或林带植被下土壤的流失有关. 径流沉积物的粒径分布在很大程度上取决于径流流速, 流速越大, 颗粒物粒径越大. 而径流流速的大小取决于降雨条件 (降雨强度、降雨量及降雨持续时间) 及地形条件 (地面坡度、材质等) (赵剑强, 2002). 另一方面, 径流沉积物的颗粒组成还受到天气状况、交通密度、工业状况及与土壤的接近程度等的影响 (Jiries *et al.*, 2001).

朱伟等 (2008) 对镇江城市不同功能区 (交通繁荣区、河滨公园、居民区及商业区) 径流颗粒物粒径进行了研究, 结果表明, 各功能区粒径在 54 ~ 500 μm 的颗粒物占大多数, 其中, 小于 250 μm 的颗粒物质量分数超过了 62%. Legret 等 (1999) 测量了高速路径流沉积物的粒径分布, 结果显示, 大于 200 μm 的颗粒物占到总体颗粒物的 79%. 美国环保局对 5 个城市的街道沉积物进行了粒径分析, 结果发现, 小于 104 μm 的颗粒物质量分数最小, 而在 105

~840 μm 之间的颗粒物所占的质量分数最大,约为40% (USEAP, 1972). 以上文献中的结论与本文的研究结果趋势基本一致,其大致规律为:小颗粒物占的质量分数较小,中等大小颗粒物质量分数最大.

3.3 污染物分布特征

如图3所示,不同粒径颗粒物中污染物质的含量不同. 颗粒物粒径越小,污染物质含量越高. 以总氮为例,在 < 63 μm 、63 ~ 106 μm 、106 ~ 355 μm 、355 ~ 500 μm 、500 ~ 850 μm 和 850 ~ 2360 μm 的颗粒物中,总氮含量分别为 2.28、1.43、0.77、0.65、0.71 和 0.53 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$,依次呈递减趋势. 这主要是因为颗粒物粒径越小,其比表面积越大,而污染物质的吸附与比表面积成正比 (Yu *et al.*, 2012).

径流中的污染物质吸附于不同粒径的颗粒物上变成颗粒态,颗粒态污染物质不利于生物利用,因此,径流沉积物的粒径分布对污染物的含量有重要影响 (朱伟等, 2008). 许多关于路面或者径流沉积物的研究中都得到了污染物质浓度随粒径增大而减小的结论. Shaheen (1975) 通过分析路面沉积物的污染特性发现,在 < 75 μm 、75 ~ 250 μm 、250 ~ 420 μm 、420 ~ 850 μm 和 850 ~ 3380 μm 的颗粒物中,COD 分别为 211、106、51、56 和 68 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$. 同时,生化需氧量和重金属 (Pb 和 Zn) 也表现出同样的变化规律. 赵剑强 (2002) 通过对不同路面沉积物的污染特征研究也得出了相同的结论.

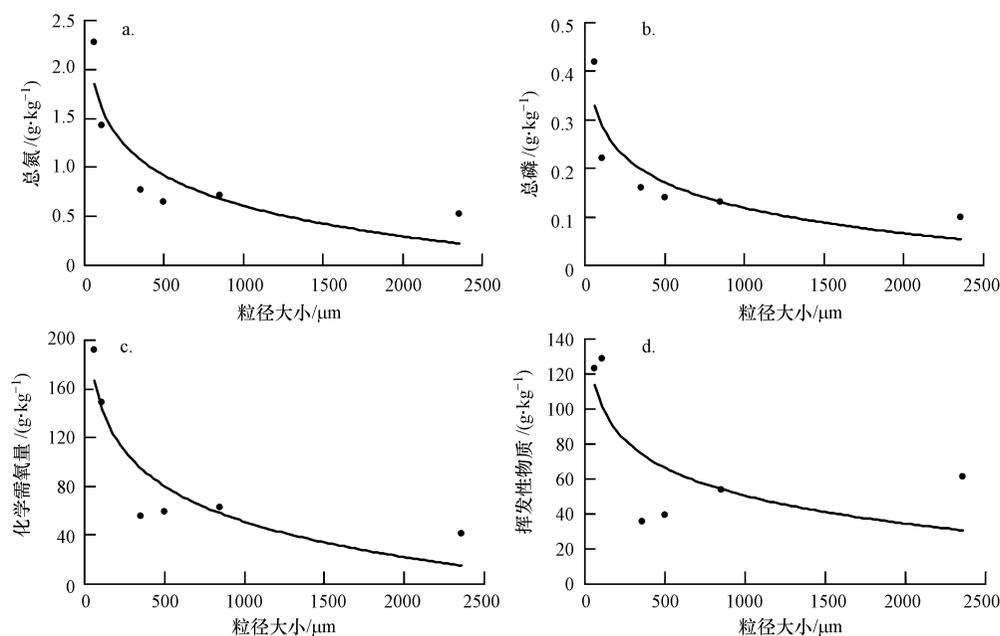


图3 污染物质含量与颗粒物粒径大小的关系

Fig. 3 Relationship between pollutants contents and particle size

为了进一步明确不同粒级颗粒物的污染情况,本文计算了 < 106 μm 的颗粒物中含有的污染物质占总污染物质的比例,结果见表2. 由表2可知,各污染物质的质量分数明显高于颗粒物本身的质量分数. 在本研究的12个采样点中,粒径小于106 μm 的颗粒物所占的质量分数平均为3.9%,而对应的污染物质量平均分数分别为:总氮18.9%,总磷17.8%,COD 20.41%,挥发性物质18.9%. 所含污染物质的质量分数为颗粒物本身质量分数的4.6倍以上. 许多研究也得出了与本文一致的结论, Roge 等 (1998) 通过总结前人的研究结果,认为路面径流携带的颗粒物中,小于100 μm 的颗粒物中包含了

不少于90%的重金属污染物质,如Zn、Pb、Cu、Cr、Ni和Cd等. Vaze和Chiew (2002)通过分析不同粒径城市路面沉积物中营养盐含量发现,在小于300 μm 的颗粒物中吸附了不少于85%的总氮或总磷. Yu等 (2010)分析了不同季节的高速路沉积物的污染特征,结果表明,在质量分数为31%的 < 250 μm 的颗粒中,总氮、总磷、COD和挥发性物质的质量分数分别为49%、51%、59%和56%.

由上可知,在径流携带沉积物中,粒径小的沉积物虽然本身所占的质量分数不高,但该部分沉积物所含的污染物质量分数却相对较高,往往是颗粒物本身质量分数的数倍以上. 小颗粒物物质处于高度

污染状态,因此,在城市停车场径流或径流携带沉积物的管理过程中,应该对该部分沉积物给以特别

的重视.可以考虑对不同粒径的沉积物采用不同的管理措施,从而达到提高处理效率的目的.

表 2 <106 μm 颗粒物中吸附的污染物质质量分数
Table 2 Pollutants contents in the particulates less than 106 μm

采样点	<106 μm 颗粒物 质量分数	<106 μm 颗粒物中吸附的污染物质质量分数			
		总氮	总磷	化学需氧量	挥发性物质
1	3.6%	10.0%	16.1%	10.2%	10.7%
2	3.8%	18.6%	15.4%	25.3%	31.9%
3	2.7%	18.0%	17.2%	25.6%	13.7%
4	0.7%	1.3%	8.1%	0.03%	0.3%
5	2.7%	17.2%	4.0%	22.8%	17.6%
6	2.4%	24.5%	25.4%	30.1%	18.5%
7	2.4%	8.1%	7.8%	6.9%	6.8%
8	9.7%	33.4%	55.1%	40.8%	36.8%
9	3.2%	21.4%	16.8%	18.3%	28.5%
10	5.1%	31.8%	21.8%	27.6%	26.3%
11	6.2%	29.2%	15.3%	22.7%	18.1%
12	3.9%	12.8%	10.8%	14.9%	17.4%
平均	3.9%	18.9%	17.8%	20.4%	18.9%

4 结论 (Conclusions)

1) 韩国沿海地区停车场径流携带废弃物的组成除大部分沉积物外,还含有不同形态的固体废物碎屑、化学药品和车辆磨损垃圾等.

2) 不同采样点的沉积物其粒径大小有所差异,颗粒物组成的均一性也不尽相同.总体来讲,停车场径流沉积物主要由介于 106 ~ 500 μm 之间的颗粒物组成,其质量分数占总颗粒物 (<2360 μm) 的 59.9%. 根据径流沉积物的粒径特征,不同粒径的颗粒物应选择不同的去除方法.

3) 在粒径小于 106 μm 的颗粒物中,其平均质量分数只占总颗粒物 (<2360 μm) 的 3.9%. 然而,总氮、总磷、化学需氧量和挥发性有机物质的平均质量分数分别达到了 18.9%、17.8%、20.4% 和 18.9%,故小粒径颗粒物处于高度污染状态.因而在城市停车场径流沉积物的管理中,对 <106 μm 颗粒物的管理尤其重要.

责任作者简介:于江华(1980—)男,博士,教授.主要研究方向为城市面源污染监测与修复技术. E-mail: yujh@nuist.edu.cn.

参考文献 (References):

- Adacgi K, Tainosho Y. 2005. Single particle characterization of size fractionated road sediments[J]. *Appl Geochem*, 20: 849-859
- APHA, AWWA, WEF. 1995. *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* (19th edition) [M]. Washington, DC: APHA
- Furumai H, Balmer H, Boller M. 2002. Dynamic behavior of suspended pollutants and particle size distribution in highway runoff[J]. *Water Sci Technol*, 46: 413-418
- Jiries A G, Halash Z. 2001. The quality of water and sediments of street runoff in Amman, Jordan [J]. *Hydrol Process*, 15: 815-824
- Kim J P, Sansalone J J. 2008. Event-based size distribution of particulate matter transported during urban rainfall-runoff events [J]. *Water Research*, 42: 2756-2768
- Legret M, Pagotto C. 2008. Evaluation of pollutant loadings in the runoff waters from major rural highway [J]. *The Science of the Total Environment*, 235: 143-150
- Murakami M, Nakajima F, Furumai H. 2005. Size and density distribution and sources of polycyclic aromatic hydrocarbons in urban road dust [J]. *Chemosphere*, 61: 783-791
- Roger S, Montrejeaud-Vignoles M, Andral M C, et al. 1998. Mineral, physical and chemical analysis of the solid matter carried by motorway runoff water [J]. *Water Research*, 32(4): 1119-1125
- Sartor J D, Boyd G B, Agardy F J. 1974. Water-pollution aspects of street

- surface contaminants [J]. *Journal of the Water Pollution Control Federation*, 46(3): 458-467
- 王书敏, 于慧, 张彬. 2011. 城市面源污染生态控制技术研究进展 [J]. *上海环境科学*, 30(4): 168-173
- 叶友斌, 张巍, 王学军. 2009. 北京城市道路积尘多环芳烃的粒度分布特征及其影响因素 [J]. *生态环境学报*, 18(5): 1788-1792
- 尹炜, 李培军, 可欣, 等. 2005. 我国城市地表径流污染治理技术探讨 [J]. *生态学杂志*, 24(5): 533-536
- Yu J, Yi Q, Kim Y. 2010. The seasonal characterization of highway particulate pollutants by size fraction [J]. *Desalination and Water Treatment*, 19: 1-6
- Yu J, Park K, Kim Y. 2012. A characteristic study on the particles in a constructed stormwater wetland during dry days [J]. *Desalination and Water Treatment*, 38: 316-325
- Zanders J M. 2005. Road sediment: Characterization and implications for the performance of vegetated strips for treating road runoff [J]. *Science of Total Environment*, 339(1/3): 41-47
- 张科峰, 傅大放, 李贺. 2012. 不同屋面雨水径流中 PAHS 污染特性及对比分析 [J]. *东南大学学报(自然科学版)*, 42(1): 99-103
- 张蕾, 周启星. 2010. 城市地表径流污染来源的分类与特征 [J]. *生态学杂志*, 29(11): 2272-2279
- 张正德, 董治宝. 2011. 腾格里沙漠东南缘春季降尘量和粒度特征 [J]. *中国环境科学*, 31(11): 1789-1794
- 赵剑强. 2002. 城市地表径流污染与控制 [M]. 北京: 中国环境科学出版社. 11-52
- 朱伟, 边博, 李磊. 2008. 镇江城市径流颗粒粒径分布及其与污染物的关系 [J]. *环境科学学报*, 28(4): 764-771