【专题：海绵城市 / Sponge City】

特邀专题策划：刘 建，任心欣

深圳典型道路原位模拟雨水生物毒性评价分析

刘 安，李玉清，郭奇聪，程 芹，詹宇婷，洪 念，杨梦婷

深圳大学化学与环境工程学院，广东深圳 518060

摘 要：为探索城市道路雨水的生物毒性，保证雨水回用的安全性，以道路雨水径流对蛋白核小球藻的毒性为例，综合解析道路雨水径流的毒性水平及其主要影响因素，探究毒性作为安全性评价指标的适宜性。通过对深圳市12条典型道路进行原位模拟道路雨水径流样品的采集和检测发现，城市路面累积的颗粒物负荷与其表面附着的重金属和总有机碳负荷并不呈现正相关。而从道路雨水径流对蛋白核小球藻的毒性来看，颗粒物、重金属以及总有机碳的负荷与表现出的毒性也没有呈明显正相关，证实了传统的海绵城市雨水回用研究中以某种(类)污染物为主要关注点的研究方法是不合适的，应将多种污染物联合表达出的毒性作为指征雨水径流能否安全回用的重要指标。另外，通过主成分分析发现，道路周边工业区用地类型是影响城市雨水径流毒性的最主要因素。相比有机污染物，重金属对城市雨水径流的毒性贡献更大。因此，在海绵城市建设中，应该根据不同的回用目标，遵循“低质低用、高质高用”的原则，对毒性较高的雨水径流进行适宜性回用，同时应更关注重金属的去除。

关键词：环境工程；雨水径流；道路雨水；雨水回用；海绵城市；生物毒性；水资源短缺；深圳

中图分类号：X131.2 **文献标志码：**A **doi:** 10.3724/SP.J.1249.2020.04355

Biotoxicity assessment of in-situ simulated stormwater runoff on typical urban roads in Shenzhen

LIU An, LI Yuqing, GUO Qicong, CHENG Qin, ZHAN Yuting,
HONG Nian, and YANG Mengting

College of Chemistry and Environment Engineering, Shenzhen University, Shenzhen 518060, Guangdong Province, P. R. China

Abstract: In order to explore the biological toxicity of urban road stormwater runoff and hence ensure its reuse safety, we comprehensively analyze the toxicity level and the main influential factors of road stormwater runoff. By using *Chlorella pyrenoidosa* as a case study, we explore the toxicity adequacy as a parameter for the stormwater reuse safety assessment. We collect the in-situ simulated runoff samples from twelve typical urban roads in Shenzhen. The results show that deposited sediment load (TS) on urban road surface is not positively correlated with the heavy metal (HM) and total organic carbon (TOC) load attached to the surface. The toxicity of road rainwater runoff to *Chlorella pyrenoidosa* is not closely related to TS, HM and TOC loads. These results confirm that traditional sponge city rainwater recycling approach for investigating stormwater quality based on particular pollutants is not appropriate. Instead, the combined toxicity given by all pollutants is a preferred option in terms of indicating whether the road stormwater can be reused safely in the process of sponge city construction. According to principal component

Received: 2019-12-17; **Accepted:** 2020-03-09

Foundation: Key-Area Research and Development Program of Guangdong Province (2019B110205003); Guangdong Basic and Applied Basic Research Foundation (2019A151010843); Undergraduate Innovation Development Foundation of Shenzhen University (2018210)

Corresponding author: Professor YANG Mengting. Email: yangmt@szu.edu.cn

Citation: LIU An, LI Yuqing, GUO Qicong, et al. Biotoxicity assessment of in-situ simulated stormwater runoff on typical urban roads in Shenzhen [J]. Journal of Shenzhen University Science and Engineering, 2020, 37(4): 355-361. (in Chinese)

analysis (PCA) results, industrial areas significantly contribute to the stormwater toxicity compared to other factors. Additionally, heavy metals could contribute more to the toxicity than organic matters. This implies that in sponge city construction, it is important to appropriately reuse stormwater with high toxicity based on the “fit for purposes” theory, as well as paying more attention to the removal of heavy metals.

Key words: environment engineering; stormwater runoff; road stormwater; stormwater reuse; sponge city; biotoxicity; water resource shortage; Shenzhen

雨水回用是海绵城市建设的关键内容^[1], 是缓解水资源短缺的主要途径之一^[2]. 雨水回用主要用于非饮用目标, 包括河道补水、绿化带植物灌溉和景观等, 从而有效减少自来水的消耗, 这对于缺水且降雨量较大的地区尤为重要. 由于城市道路面积较大, 所产生的雨水径流较多, 因此道路雨水是回用水的主要部分^[3]. 但由于城市交通等人类活动的影响, 道路表面污染物累积负荷较高. HONG 等^[4]研究发现, 城市道路上铬 (Cr)、铜 (Cu)、铅 (Pb)、镍 (Ni) 和锌 (Zn) 的累积负荷分别为 19.05 ~ 152.01、25.66 ~ 310.75、15.61 ~ 220.35、10.65 ~ 100.28 和 38.14 ~ 1 047 mg/kg; HWANG 等^[5]研究发现雨水径流中的多环芳烃质量浓度为 1.5 ~ 12.5 $\mu\text{g/L}$. 由于大多数污染物对动植物或人体具有毒性, 如重金属和有机污染物等^[6-10], 而这些污染物大部分附着在道路颗粒 (road deposited sediments, RDS) 表面^[11], 降雨时, 污染物会随着颗粒被冲刷进入雨水径流, 威胁雨水回用安全.

雨水径流中的污染物种类众多^[12-17], 甚至可能含有未知的毒性较大的污染物. 目前, 大多数雨水回用研究主要集中在污染物本身, 对污染物综合表达出的联合毒性尚未深入研究. 相比于传统研究单一一种类污染物的方法, 综合考虑所有污染物产生的联合毒性更符合实际应用, 也是指示雨水能否安全回用的重要指标. 据此, 本研究突破传统以污染物本身为主要对象的研究现状, 选取典型淡水藻——蛋白核小球藻 (*Chlorella pyrenoidasa*), 关注道路雨水径流中所有污染物表达出的联合毒性. 蛋白核小球藻是一种单细胞淡水藻, 属绿色微藻, 因其分布广泛、生长时间短、对污染物敏感, 常被用作水质指示物种, 或者应用于生态毒理学研究^[18-21]. 蛋白核小球藻与毒物接触充分且敏感, 适用于地表饮用水安全预警以及废水综合毒性研究. 而且, 蛋白核小球藻是河道生态系统中的生产者, 雨水回用于河道后, 水质变化对河道生态系统的影响可根据蛋白核小球藻的生长情况做初步判断, 指示生态毒性风险. 本研究以道路雨水对蛋白核小球藻的毒性为

例, 综合解析道路雨水的径流毒性水平及其主要影响因素, 探究雨水毒性作为回用安全评价指标的适宜性, 为保证海绵城市建设中道路雨水回用安全提供重要的理论依据.

1 材料与方法

1.1 研究地点

在深圳市选取了 12 个典型道路作为采样点, 如图 1, 各采样点获得的水样样品对应编号为 S1—S12.

图 1 各采样点的具体位置

Fig. 1 Study sites and their locations

如图 1, 每个采样点周边具有不同的土地利用类型 (R 、 C 和 I 分别为住宅区、商业区和工业区占地面积百分比)、交通流量 (traffic volume, TV) 和路面粗糙度等条件. 所有采样道路均平坦且铺有沥青. 样品采集的同时收集与道路特征相关的参数, 如表 1. 其中, 交通流量数据采用人工计数法得到. 土地类型百分数用来表征道路周边的功能区分布, 其计算方法为: 将研究区域划分成分辨率为 50 m $\times$ 50 m 的正方形网格, 每个网格根据实际土地利用类型分别定义为居住区、工业区或商业区. 土地类型百分数为: 以采样点所在网格为中心同时与距该网格 3 格网格共同组成的正方形为总面积, 以采样点为中心的正方形网格内功能区面积占总面积的百分数^[2-3]. 路面粗糙度用路面构造深度 (surface texture

depth, STD) 表征, 采用铺沙法得到. 文献[22]研究表明, 路面越粗糙, 坑洼越多, 滞留在路面的污染物负荷越高. 另外, 汽车轮胎与路面的摩擦力随

路面粗糙度的增加而增大, 从而使路面污染物负荷增大. 因此, 路面粗糙度是影响路面污染物负荷的重要因素.

表 1 采样点道路特征参数及坐标^[23]
Table 1 Characteristics and coordinates of road sites^[23]

采样点	TV/(veh·h ⁻¹)	R/%	C/%	I/%	STD/mm	坐 标	
S1	3 296	35	0	6	3.10	22°35'58.24"N	113°58'37.14"E
S2	2 336	73	0	0	2.36	22°35'12.22"N	113°57'51.16"E
S3	1 430	57	31	20	0.58	22°34'28.25"N	113°56'15.86"E
S4	4 064	82	0	0	1.77	22°34'17.24"N	113°57'38.09"E
S5	1 872	0	0	43	0.90	22°34'44.77"N	113°56'1.36"E
S6	4 216	0	0	67	0.80	22°34'0.91"N	113°56'30.59"E
S7	1 904	4	0	22	1.38	22°34'27.61"N	113°55'14.59"E
S8	5 104	61	0	37	3.24	22°35'14.05"N	113°59'1.39"E
S9	1 120	67	22	14	0.95	22°34'29.00"N	113°57'11.58"E
S10	1 120	24	55	0	0.56	22°35'3.55"N	113°56'42.11"E
S11	6 288	43	53	0	1.91	22°34'54.38"N	113°57'19.11"E
S12	1 616	69	14	16	2.36	22°35'2.50"N	113°58'11.34"E

1.2 原位模拟雨水径流采集及污染物检测

由于真实道路雨水径流的变异性较大, 并受到降雨特征、道路环境等多种因素的影响^[24-25], 因此本研究采用原位模拟雨水径流展开调查. 利用真空干湿微粒采集器(型号为海尔 ZTBJ1200, 1 200 W)采集原位模拟的雨水径流. 在每个道路站点框定 1 个 4.5 m² 的采样区域, 且该区域位于路缘与道路中央线之间. 文献[26-27]研究表明, 污染物负荷在路面各位置的分布存在差异, 路缘的污染物负荷相对较高, 而道路中心线位置较低. 所以采集位于路缘与道路中央线之间的污染物更具有代表性. 首先, 在道路表面干燥条件下吸尘采集 2 次; 然后, 将路面喷湿至刚好不产生径流, 再采集 1 次. 采样过程中使用的水均为去离子水, 采样结束后将水样转移到酸洗过的聚乙烯瓶中, 于 4 ℃ 条件下保存. 在本研究中, 采样前的前期干燥期为 7 d, 这是因为城市路面污染物负荷通常在 7 个干燥日之后达到累积平衡^[28].

文献[29]研究表明, 约 60%~80% (质量分数) 的污染物均吸附在粒径小于 75 μm 的 RDS 上, 因此, 本研究所采集的原位模拟雨水径流样品针对粒径小于 75 μm 的样品进行污染物及毒性的检测. 所检测的污染物指标主要包括与城市交通密切相关的 6 种重金属(Cu、Zn、Ni、Pb、Cd 和 Cr)总负荷(单

位: μg/m²)、总有机碳(total organic carbon, TOC; 指征有机污染物)负荷(单位: mg/m²)和固体总负荷(total solids, TS; 代表雨水径流的 RDS 负荷, 单位: g/m²). 以上污染物均根据《水和废水检测标准方法》中的标准方法进行检测. 其中, TS 的测定使用重量法, 重金属的测定主要使用电感耦合等离子体质谱(美国 Perkin-Elmer, 型号为 NexION 350X), TOC 的测定使用总有机碳分析仪(日本 Shimadzu, 型号为 TOC-L CHS).

1.3 原位模拟雨水径流对蛋白核小球藻的毒性试验

蛋白核小球藻购自中国科学院水生生物研究所, 接种于 BG-11 培养液中, 外部培养条件由人工气候箱(BluePard)提供, 温度为 25 ℃, 光源为白色荧光灯, 光照强度为 5 000 lux, 光暗周期为 12 h/12 h. 当藻细胞处于对数生长期时, 进行雨水径流毒性试验.

从每个雨水径流水样中取出 3 个不同体积(0、50 和 240 mL)的水样, 冷冻干燥成灰白色粉末后加至 8 mL 藻液中. 在人工气候箱内培养 72 h 后使用自动细胞计数仪(中国 Countstar, 型号为 IA1000)测定藻细胞密度, 同时使用荧光分光光度计(美国 Thermo Scientific Lumina)测定叶绿素 a 的荧光强度, 基于藻细胞密度和叶绿素 a 荧光强度, 根据式(1)和式(2)分别计算得到对应的生长抑制率 I_1 和 I_2 ,

随后使用 Sigmaplot 12 软件对毒性数据进行回归分析.

$$I_1 = \left(\frac{\ln N_{tc} - \ln N_{0c}}{t} - \frac{\ln N_t - \ln N_0}{t} \right) / \left(\frac{\ln N_{tc} - \ln N_{0c}}{t} \right) \times 100\% \quad (1)$$

其中, N_{tc} 和 N_{0c} 分别为对照组的初始及暴露 72 h 后的藻细胞密度; N_0 和 N_t 分别为实验组的初始及暴露 72 h 后的藻细胞密度; t 为暴露天数, 这里 $t = 3$ d.

$$I_2 = \frac{F_c - F_t}{F_c} \times 100\% \quad (2)$$

其中, F_c 和 F_t 分别为对照组和实验组的叶绿素 a 荧光响应强度.

为直观反映城市路面径流毒性的大小, 本研究采用等效毒理面积 (equivalent toxicity area, ETA) 法进行样品间的毒性水平比较. 具体步骤为: ① 从原始水样 (已过孔径为 75 μm 的分样筛) 中取出体积为 V_i 的水样用于毒性试验; ② 通过式 (3) 转换为对应的等效毒理面积, 并指定 4.5 m^2 对应 100% 的抑制率; ③ 将其与另外 3 个体积 (0、50 和 240 mL) 对应的抑制率进行函数拟合, 得到“抑制率-等效毒理面积”曲线. 生长抑制率为 50% 所对应的等效毒理面积称为半抑制等效毒性面积 (half lethal concentration, IC_{50}), 其数值越小代表该水样对藻的毒性越强, 因此, 通过比较 IC_{50} 值的大小可分析各采样点原位模拟雨水径流的毒性强弱.

$$\text{ETA}_i = \frac{A \times V_i}{V} \quad (3)$$

其中, ETA_i 为已过孔径为 75 μm 分样筛的原始水样的等效毒理面积; V 为每个采样点原始水样 (已过孔径为 75 μm 的分样筛) 的总体积; A 为每个采样点的总面积.

2 结果与讨论

2.1 原位模拟雨水径流中典型污染物的负荷解析

通过对原位模拟雨水径流所采样品污染物进行检测, 结果如图 2. 由图 2 (a) 可知, 在 12 个采样点中, 大部分采样点的 TS 负荷低于 20.00 g/m^2 , 但 S2 和 S6 的 TS 负荷明显高于平均水平, 分别为 44.60 g/m^2 和 40.46 g/m^2 . 由图 2 (b) 可知, 多数采样点水样的 TOC 负荷介于 50.00 ~ 100.00 mg/m^2 , 但 S4 和 S12 的 TOC 负荷超过平均水平的 2 倍, 分别为 229.20 mg/m^2 和 195.70 mg/m^2 . 根据

图 2 (c) 数据, 大多数采样点水样的 6 种重金属 (heavy metal, HM) 负荷之和低于 350.00 $\mu\text{g}/\text{m}^2$, 有的甚至接近 0; 而 S4 的 HM 负荷远远高于平均水平, 为 4 588.89 $\mu\text{g}/\text{m}^2$, 比 S12 的 HM 值高出 14 倍; S12 的 HM 负荷仅次于 S4, 为 319.47 $\mu\text{g}/\text{m}^2$.

综合比较图 2 (a)、(b)、(c) 的数据可知, S2 和 S6 的 TS 负荷明显高于其他采样点, 但二者的 TOC 负荷却处于平均水平, 介于 50.00 ~ 100.00 mg/m^2 , 且二者的 HM 负荷相对较低, 分别为 25.46 $\mu\text{g}/\text{m}^2$ 和 58.69 $\mu\text{g}/\text{m}^2$; S4 和 S12 的 TS 负荷相对较小, 但二者的 TOC 和 HM 负荷均远高于其他采样点. 这说明城市路面的重金属和有机污染物并不随着 TS 负荷的增加而增大, 即城市路面的 TS 累积的越多并不代表该路面受污染程度越大. 然而, 目前许多用于揭示城市雨水径流污染强度的数学模型 (如 MIKE URBAN 和 SWMM 等) 大多基于 TS 值

(a) TS 负荷

(b) TOC 负荷

(c) 6种重金属Cu、Zn、Ni、Pb、Cd和Cr负荷之和

图 2 原位模拟雨水径流水质数据

Fig 2 In-situ simulated stormwater quality

来建立, 通过赋某种污染物与 TS 比值, 从而以 TS 负荷的模拟值计算其他污染物的负荷水平. 根据本研究结果, 传统的以 TS 为主的雨水径流水质模拟方法存在缺陷, 并不能较为准确地预测城市雨水径流的受污染程度.

2.2 原位模拟雨水径流对蛋白核小球藻的毒性分析

图 3 为每条道路基于藻细胞密度和藻叶绿素 a 含量的毒性曲线. 图 4 是基于藻细胞密度和藻叶绿素 a 含量的 IC_{50} 值(分别记作 IC_{50} -cell 和 IC_{50} -chla), 其中, 由于 S4 和 S9 的样品量不足, 因此该图中未包括 S4 和 S9 的拟合曲线. 由图 3 和图 4 可见, 同一水样中, 污染物对藻细胞密度的 IC_{50} 值与叶绿素 a 含量的 IC_{50} 值相差不大. 几乎所有水样的 IC_{50} 值均小于 1 m^2 . 这说明导致藻的抑制率为 50% 的原位模拟雨水径流所需道路面积均小于 1 m^2 .

对比所有道路水样可发现, S5 水样的毒性最强, 藻细胞密度和叶绿素 a 含量的 IC_{50} 值分别为 0.22 m^2 和 0.27 m^2 ; S1 水样的毒性最弱, 藻细胞

图 3 各采样点水样对蛋白核小球藻的抑制率-等效毒理面积拟合曲线

Fig. 3 The *Chlorella pyrenoidasa* toxicity curve of stormwater runoff for each road site

图 4 各采样点水样基于藻细胞密度和叶绿素 a 含量的 IC_{50} 值

Fig. 4 IC_{50} value in cell number and IC_{50} value in chlorophyll a

密度和叶绿素 a 含量的 IC_{50} 值分别为 1.01 m^2 和 0.89 m^2 ; S6、S7、S8 和 S12 水样的毒性接近但略弱于 S5; S2 和 S3 水样的毒性接近, 但略强于 S1 的; S10 和 S11 水样毒性大小比较接近. 将污染物的藻毒性数据与典型污染物负荷数据进行对比可知, S5 水样对藻的毒性最强, 但其 TOC 和 HM 负荷均不是最高的; S1 水样对藻的毒性最弱, 但其 TOC 和 HM 负荷均不是最低的; S12 水样的 TOC 和 HM 负荷虽明显大于 S5、S6、S7 和 S8 的, 但其对藻的毒性却并未明显强于以上 4 者. 由相关性分析(表 2)也可知, 雨水径流毒性与 TS、TOC 和 HM 负荷之间的相关系数较低, 进一步说明了城市雨水径流的毒性并不与城市路面的颗粒物, 重金属和有机污染物负荷存在明显的正相关 ($P > 0.05$), 雨水径流毒性的来源除了重金属和有机污染物外, 很有可能来自其他污染物(或未知污染物). 因此传统的雨水回用研究方法中仅以某单一种(类)污染物的含量来评价城市雨水径流危害性的方法是不合适的, 而应关注各类污染物共存时表现出的联合毒性. 这能够为海绵城市建设中最大限度保障道路雨水回用安全提供重要的技术方法.

表 2 相关性分析					
Table 2 Correlation analysis					
	TS	TOC	HM	IC_{50} -cell	IC_{50} -chla
TS	1.000				
TOC	-0.131	1.000			
HM	0.372	0.697 ¹⁾	1.000		
IC_{50} -cell	-0.130	-0.456	-0.297	1.000	
IC_{50} -chla	0.274	-0.278	0.007	0.799 ¹⁾	1.000

¹⁾ 在 0.05 级别相关性显著

2.3 毒性影响因子的解析

城市雨水径流毒性的影响因素众多, 本研究主要分析 TV、STD、C、I、R、TS、TOC、6 种 HM 总负荷与雨水径流毒性之间的关系, 从而识别城市道路雨水径流毒性的主要影响因素。其中, 毒性数据采用 IC_{50} 值 (基于藻细胞数量和藻叶绿素 a) 的倒数, 即 IC_{50} 值倒数越大, 对应毒性越大。

由主成分分析图 (图 5) 可知, 工业区比例 (I) 的矢量与毒性矢量 (基于细胞数量和叶绿素 a) 的夹角最小, 这说明道路周边工业区土地利用占比是影响城市雨水径流毒性的最主要因素; 重金属和有机污染物含量的矢量也均与毒性矢量呈现相对较小的夹角。但相比于有机物, 重金属矢量与毒性矢量的夹角更小, 这说明重金属对雨水径流毒性的贡献可能相对大于有机污染物; 道路周边商业区和居住区土地利用占比对城市雨水径流毒性的影响不大, 交通流量和路面构造深度对城市雨水径流毒性的影响也相对较弱。该结果说明相比有机污染物, 回用城市路面雨水时更应关注重金属的去除。此外, 因为工业区路面雨水径流毒性较大, 在回用中可能存在较高风险。但值得注意的是, 这并不代表所有工业区道路的雨水径流均不适宜回用。在海绵城市建设中, 应根据不同的回用目标, 遵循“低质低用, 高质高用”的原则, 对毒性较高的雨水径流进行适宜性回用。

图 5 城市雨水径流毒性影响因素的主成分分析图

Fig. 5 PCA biplot for stormwater toxicity and influential factors

结 语

本研究探索了毒性作为新的指标来评价雨水回用安全的适宜性。主要结论如下:

1) 在海绵城市建设中, 为保障雨水回用安全,

仅关注雨水中的污染物是不适合的。采用污染物-毒性联合的评价方法更能够为安全性保障提供理论和数据依据。

2) 工业用地是影响城市雨水径流毒性的最主要因素。相比有机污染物, 重金属对城市雨水径流的毒性贡献更大。因此, 在海绵城市建设中, 应关注重金属的去除。

3) 在海绵城市建设中, 应根据不同的回用目标, 遵循“低质低用, 高质高用”的原则, 对毒性较高的雨水径流进行适宜性回用。

基金项目: 广东省重点领域研发计划资助项目 (2019B110205003); 广东省基础与应用基础研究基金资助项目 (2019A1515010843); 深圳大学大学生创新发展基金基础实验资助项目 (2018210)

作者简介: 刘 安 (1983—), 深圳大学副教授、博士。研究方向: 城市面源污染, 海绵城市。E-mail: liuan@szu.edu.cn
杨梦婷 (1987—), 深圳大学特聘研究员。研究方向: 环境毒理和消毒副产物。E-mail: yangmt@szu.edu.cn

引 文: 刘 安, 李玉清, 郭奇聪, 等. 深圳典型道路原位模拟雨水生物毒性评价分析 [J]. 深圳大学学报理工版, 2020, 37(4): 355-361.

参考文献 / References:

- [1] LIU Liang, LIU An, LI Yang, et al. Polycyclic aromatic hydrocarbons associated with road deposited solid and their ecological risk: implications for road stormwater reuse [J]. Science of the Total Environment, 2016, 563/564: 190-198.
- [2] HONG Nian, ZHU Panfeng, LIU An. Modelling heavy metals build-up on urban road surfaces for effective stormwater reuse strategy implementation [J]. Environmental Pollution, 2017, 231(1): 821-828.
- [3] HONG Nian, LIU An, ZHU Panfeng, et al. Modelling benzene series pollutants (BTEX) build-up loads on urban roads and their human health risks: implications for stormwater reuse safety [J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2018, 164: 234-242.
- [4] HONG Nian, ZHU Panfeng, LIU An, et al. Using an innovative flag element ratio approach to tracking potential sources of heavy metals on urban road surfaces [J]. Environmental Pollution, 2018, 243: 410-417.
- [5] HWANG H M, FOSTER G D. Characterization of polycyclic aromatic hydrocarbons in urban stormwater runoff flowing into the tidal Anacostia River, Washington, DC, USA [J]. Environmental Pollution, 2006, 140 (3): 416-426.
- [6] MA Yukun, JAMES M, LIU An, et al. Catchment scale assessment of risk posed by traffic generated heavy metals and polycyclic aromatic hydrocarbons [J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2017, 144: 593-600.
- [7] ZHANG Jin, WU Junwei, PEI Hua, et al. The influence of land use on source apportionment and risk assessment of polycyclic aromatic hydrocarbons in road-deposited

- sediment [J]. Environmental Pollution, 2017, 229: 705-714.
- [8] MA Yukun, LIU An, PRASANNA E, et al. Quantitative assessment of human health risk posed by polycyclic aromatic hydrocarbons in urban road dust [J]. Science of the Total Environment, 2017, 575: 895-904.
- [9] 田华, 杨柳, 夏紫顿, 等. 西安市临潼区地表颗粒物重金属分布特征及生态风险评价 [J]. 生态学报, 2018, 27(2): 276-281.
- TIAN Hua, YANG Liu, XIA Zidun, et al. Distribution and ecological risk assessment of heavy metals in road sediments of Lintong district, Xi'an [J]. Ecology and Environment Sciences, 2018, 27(2): 276-281. (in Chinese)
- [10] 段海静, 蔡晓强, 阮心玲, 等. 开封市公园地表灰尘重金属污染及健康风险 [J]. 环境科学, 2015, 36(8): 2972-2980.
- DUAN Haijing, CAI Xiaoqiang, RUAN Xinling, et al. Assessment of heavy metal pollution and its health risk of surface dusts from parks of Kaifeng, China [J]. Environmental Science, 2015, 36(8): 2972-2980. (in Chinese)
- [11] TRUJILLO-GONZÁLEZ M J, TORRES-MORA A M, JIMÉNEZ-BALLESTA R, et al. Land-use-dependent spatial variation and exposure risk of heavy metals in road-deposited sediment in Villavicencio, Colombia [J]. Environmental Geochemistry and Health, 2019, 41(2): 667-679.
- [12] AL-BALDAWI I A, ABDULLAH S R, ANUAR N, et al. Phytodegradation of total petroleum hydrocarbon (TPH) in diesel-contaminated water using *Scirpus grossus* [J]. Ecological Engineering, 2015, 74: 463-473.
- [13] MEGAN A R, DELETIC A, BLACK J, et al. Pesticide occurrence and spatio-temporal variability in urban run-off across Australia [J]. Water Research, 2017, 115: 245-255.
- [14] HUSSAIN K, RAHMAN M, PRAKASH A, et al. Street dust bound PAHs, carbon and heavy metals in Guwahati city: seasonality, toxicity and sources [J]. Sustainable Cities and Society, 2015, 19: 17-25.
- [15] LI Haiyan, WANG Youshu, LIU Fei, et al. Volatile organic compounds in stormwater from a community of Beijing, China [J]. Environmental Pollution, 2018, 239: 554-561.
- [16] 丁晴晴, 李科, 董黎明. 北京市冬季道路沉积物中多环芳烃的污染特征和源解析 [J]. 环境化学, 2016, 35(9): 1903-1912.
- DING Qingqing, LI Ke, DONG Liming. Pollution characteristics and source apportionment of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in road sediments of Beijing in winter [J]. Environmental Chemistry, 2016, 35(9): 1903-1912. (in Chinese)
- [17] 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 Yufen, WANG Xiaoke, OUYANG Zhiyun, et al. The pollution characteristics of Beijing urban road sediments [J]. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(8): 2365-2371. (in Chinese)
- [18] TAO Lu, ZHU Youchao, XU Jiahui, et al. Evaluation of the toxic response induced by azoxystrobin in the non-target green alga *Chlorella pyrenoidosa* [J]. Environmental Pollution, 2018, 234: 379-388.
- [19] WEI Zhang, XIONG Bang, SUN Wenfang, et al. Acute and chronic toxic effects of bisphenol a on *Chlorella pyrenoidosa* and *Scenedesmus obliquus* [J]. Environmental Toxicology, 2014, 29(6): 714-722.
- [20] FU Ling, LI J J, WANG Yu, et al. Evaluation of toxicity data to green algae and relationship with hydrophobicity [J]. Chemosphere, 2015, 120: 16-22.
- [21] MO Lingyun, ZHAO Danna, MENG Qin, et al. Joint toxicity of six common heavy metals to *Chlorella pyrenoidosa* [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2019, 26(30): 30554-30560.
- [22] MAHBUB P, GOONETILLEKE A, AYOKO G A. Prediction model of the buildup of volatile organic compounds on urban roads [J]. Environmental Science & Technology, 2011, 45(10): 4453-4459.
- [23] ZHAN Yuting, YANG Bo, HONG Nian, et al. Developing an equivalent toxicity area approach to comparing toxicity of urban road deposited sediments [J]. Environmental Pollution, 2020, 257: 113588.
- [23] LARS H, ASHANTHA G, GODWIN A A. Analysis of heavy metals in road-deposited sediments [J]. Analytica Chimica Acta, 2006, 571(2): 270-278.
- [24] GUNAWARDANA C, GOONETILLEKE A, PRASANNA E, et al. Source characterisation of road dust based on chemical and mineralogical composition [J]. Chemosphere, 2012, 87(2): 163-170.
- [25] DELETIC A, ORR D W. Pollution buildup on road surfaces [J]. Journal of Environmental Engineering, 2005, 131(1): 49-59.
- [26] NOVOTNY V, SUNG H M, BANNERMAN R, et al. Estimating nonpoint pollution from small urban watersheds [J]. Journal Water Pollution Control Federation, 1985, 57(4): 339-348.
- [27] EGODAWATTA P, ZIYATH A M, GOONETILLEKE A. Characterising metal build-up on urban road surfaces [J]. Environmental Pollution, 2013, 176: 87-91.
- [28] HONG Liang, CHEN Liang, LADIKA M, et al. Impact of particle size and surface charge density on redispersibility of spray-dried powders [J]. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 2014, 459: 274-281.
- [29] LI Haiyan, SHI Anbang, ZHANG Xiaoran. Particle size distribution and characteristics of heavy metals in road-deposited sediments from Beijing Olympic Park [J]. Journal of Environmental Sciences, 2015, 32: 228-237.