

太湖流域苏州城区不同用地类型降雨径流中重金属的生态风险评价*

孙甜甜, 田永静**, 赵 炜, 孙 康, 姜 涛

(苏州科技大学, 苏州 215009)

摘 要: 随着城市化进程的不断加快,不同用地类型上产生的降雨径流中重金属含量高且差异较大,而目前仍缺乏对降雨径流所携带的重金属风险评价的研究. 以苏州城区为研究对象,选取商业区、居住区、历史文化保护区和文教区,监测降雨径流中铜(Cu)、锌(Zn)和铅(Pb)3种常见重金属浓度,通过物种敏感性分布(SSD)曲线获取预测无效应浓度(PNEC),基于重金属的生态有效性,应用风险商(RQ)法对重金属的生态风险进行评价. 结果表明:以6场有效降雨事件的事件平均浓度(EMC)统计结果的平均值为分析依据,对照《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002),苏州城区径流中的Zn、Cu浓度满足Ⅱ类水质标准,Pb浓度则劣于Ⅴ类水质标准;主要受地面交通活动和屋面材料的影响;在不同用地类型内Cu、Pb和Zn浓度的分布存在一定差异,商业区受重金属污染程度最为严重,其余3种用地类型均不同程度受到不同重金属的污染,对应的3种重金属的生态风险在不同用地类型内也显示相同规律;不同的重金属产生不同的环境行为,导致对水生生物的毒性差异较大,降雨径流中的重金属浓度在水环境中产生的有效生态风险程度为Pb>Cu>Zn. 研究认为Cu、Zn和Pb对淡水生物的生态风险均达到高风险程度,而我国目前的《地表水环境质量标准》未充分考虑生态影响,低估了部分重金属的生态风险.

关键词: 生态风险评价;重金属;降雨径流;风险商;用地类型;苏州;太湖流域

Ecological risk assessment of heavy metals in rainfall runoff of different land use types in Suzhou of Taihu Basin *

SUN Tiantian, TIAN Yongjing**, ZHAO Wei, SUN Kang & JIANG Tao

(Suzhou University of Science and Technology, Suzhou 215009, P.R.China)

Abstract: With the rapid development of urbanization, heavy metal pollution resulting from runoff increase and vary greatly in different land use. However, there is still a lack of research on the risk assessment of heavy metal carried by the runoff. In Suzhou urban area, four land use types including commercial area, residential area, historical and cultural protection area, and cultural and educational area were selected to monitor the content of Cu, Zn and Pb in rainfall runoff. Further, the ecological risk of these three heavy metals was evaluated by risk quotient (RQ), which was on the basis of predicted no-effect concentration (PNEC) obtained by species sensitivity distribution (SSD) curve. Based on the event mean concentration (EMC) of six effective rainfall events, compared with the Environmental Quality Standard for Surface Water (GB 3838-2002), statistical results show that Zn and Cu in the rainfall runoff meet grade II water quality standard, while Pb is inferior to grade V water quality standard, which are mainly affected by the traffic activities and roofing materials in different land use types. Correspondingly, commercial area is polluted by all these three heavy metals worst, the other areas are polluted in different degrees by different heavy metals, resulting in a large difference in toxicity to aquatic organisms. Generally, the ecological risks by heavy metals in rainfall runoff are in high-risk degree, and in the order of Pb>Cu>Zn. Therefore, the current environmental quality standard for surface water in China does not fully consider the ecological impact and underestimates the ecological risks of heavy metals.

Keywords: Ecological risk assessment; heavy metals; rainfall runoff; risk quotient; land use types; Suzhou; Taihu Basin

* 2019-11-20 收稿;2020-02-11 收修改稿.

国家水体污染控制与治理科技重大专项(2017ZX07205-001-03)资助.

** 通信作者;E-mail:tianyongjing@126.com.

改革开放四十年来,中国经济得以飞速发展,伴随的城镇化水平也在不断推进.数据表明,近十年来,苏州市生产总值一直处于全国前7位,产业聚集,人口富集,城镇面积不断扩大^[1-2].随着城市化进程的不断加快,城市用地类型发生较大改变,下垫面透水面积比例骤减^[3],阻碍了水的自然循环过程,影响了原有的水文特征^[4].另一方面,城市化和工业化进程也加速了有限资源的开发,造成了许多环境污染问题^[5-6].工业化作为驱动建设用地扩张的重要动力^[7],随着第二产业比重增长^[8],土地利用方式发生了巨大的变化,环境压力 and 环境污染水平也逐年升高,导致生态环境恶化、生态系统退化等生态问题频发^[9].苏州市作为长三角经济带的核心区域,工业化和城镇化进程较快,同样面临着社会快速发展与环境承载力的矛盾这一困境.其中降雨径流作为产生非点源污染的主要方式,携带了大量来自大气沉降、路面及屋面、管道沉积物中的重金属随雨水径流迁移转化,最终汇入受纳水体^[10].河道中的重金属不仅会对水生生物造成直接的负面效应,同时可在微生物作用下转化为毒性更高的重金属形态,沿着食物链进行富集、放大,最终对人类健康带来潜在的威胁^[11],因此对降雨径流中重金属含量进行生态风险评价是切实必要的.然而,目前的生态风险评价多为研究水域中污染物浓度及分布,研究对象多为海洋、湖泊等水体及沉积物^[12-17],缺少对不同用地类型中降雨径流所携带的重金属风险评价的研究.

生态风险评价(ecological risk assessment, ERA)是在特定的污染物暴露浓度下,对生态系统或其组分中出现不利因素的可能性和危害性进行评估,判断其不利影响的概率和大小.其中物种敏感性分布(species sensitivity distribution, SSD)法是一种置信度较高的统计学外推法,目前已广泛应用于污染物质的生态风险评价和水质基准的推导.王宏伟等^[15]基于重金属的SSD曲线,采用风险商(RQ)法对天津渤海湾表层水体中重金属浓度进行生态风险评价,发现研究区域内重金属浓度均满足I类或II类海水水质标准,然而水体中Zn和Cu浓度将对水生生物造成不利影响,认为我国现行的《海水水质标准》低估了Zn和Cu对生态环境的影响;杜建国等^[16]构建了8种常见重金属的SSD曲线,结果表明重金属对所研究的海洋生物全部物种HC₅值的排序为Pb>Mn>Zn>Cr>Cu>Hg>Cd>As;孔祥臻等^[17]通过构建6种常见重金属的SSD曲线对淡水生物的生态风险进行评估,认为Cu对淡水生物的生态风险最高,其HC₅值为4.50 μg/L, Mn的毒性相对较小,其HC₅值为109.70 μg/L; Ma等^[18]以根菜为例,基于食品质量标准推导出土壤中镉的阈值,并利用SSD法进行健康风险评估,在弱酸性(pH 5.5~6.5)、有机碳含量为20 g/kg的土壤中,镉的HC₅值为0.46 μg/L.穆景利等^[19]应用SSD模型分析比较了基于不同毒性数据推导的镉、铅、狄氏剂和马拉硫磷的预测无效应浓度(predicted no-effect concentration, PNEC)值的差异性和相关性,发现淡水生物的毒性数据的引入可能会对部分海洋生物造成“过保护”或“欠保护”现象;李政等^[20]搜集一系列污染物对泥鳅的急性毒性数据,通过构建SSD曲线判断泥鳅对不同污染物的敏感程度,结果表明,Cu²⁺对泥鳅表现为剧毒级污染物,而Ni²⁺表现为中等毒级污染物,泥鳅对其有较好的耐受性;张智慧等^[21]测定糙米中Cd、Pb、Cu和Zn的浓度,研究表明Cd和Pb含量的超标率较高,是稻米中主要污染物,通过Bur III分布拟合SSD曲线,得出保证95%水稻不超标的土壤中重金属Cd和Pb的有效态含量限值为0.02、0.005 mg/kg.

本文通过选取苏州市不同用地类型作为研究区域,对苏州雨水径流中Cu、Zn和Pb 3种重金属浓度进行分析 and 总结,基于毒性数据的SSD曲线和实测浓度,计算不同用地类型中3种重金属的风险商(RQ)并作分析与比较,评价苏州降雨径流中重金属污染的生态风险,旨在为中国水体重金属污染的风险管理和风险评价提供科学的理论依据.

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

本研究的区域为苏州市中心区域内娄江污水厂、城东污水厂、福星污水厂的服务范围,如图1所示的红色区域,总面积100.8 km²,该研究区域人口密集、河网密布,名胜古迹、幽宅小巷众多,集居住、商贸、旅游于一体,是最具苏州特色的区域.

用地类型对重金属在地表灰尘与土壤中的积累有较明显的差异^[22-23].如在工业区、商业区和高密度人口居住区产生径流中其重金属浓度高于绿化区和低密度人口居住区.本研究选择的典型用地类型为商业区、住宅区、历史文化保护区、文教区.经过实地考察和管网信息勘探,每个用地类型设置1~2个监测点,共

计7个监测点:邵磨针巷(邵)、阔巷(阔)、肖家巷(肖)、南石子街(南)、彩香二村(彩)、尚运苑(尚)和环境学院(环). 表1列出了各监测点的综合信息. 各监测点均具有较好的代表性,在监测点附近(<1 km)设置了3个雨量监测点,径流监测点和雨量监测点布局如图1所示,整体呈东北-西南的对角线排布.

表1 苏州城区降雨径流采样监测点汇总*
Tab.1 Summary of rainfall runoff sampling sites in Suzhou

监测点	汇水面积	综合径流系数	用地类型	交通情况
邵磨针巷	汇水面积 3.0 hm ² , 面积占比为建筑物:水泥道路: 砖石铺砌路:绿化=66:1:2.6:0.4	0.83	商业区	人流量大、交通拥挤
阔巷	汇水面积 6.4 hm ² , 面积占比为建筑物:沥青道路: 绿化=65:34:1	0.84	商业区	
肖家巷	汇水面积 1.4 hm ² , 面积占比为建筑物(斜坡瓦屋面): 混凝土道路:砖石铺砌路:绿化=76:8:15:1	0.78	历史文化保护区	人流量大、机动车无法通行
南石子街	汇水面积 2.5 hm ² , 面积占比为建筑物(斜坡瓦屋面): 混凝土道路:砖石铺砌路:绿化=76:8:15:1	0.77	历史文化保护区	
彩香二村	汇水面积 4.1 hm ² , 面积占比为建筑物:水泥+沥青道路: 绿化=61:30:9	0.79	住宅区	人流量大、车流量较小
尚运苑	汇水面积 2.7 hm ² , 面积占比为建筑物:砖砌+沥青路面: 绿化=19:21:60	0.45	住宅区	
环境学院	汇水面积 2.09 hm ² , 面积占比为建筑物:沥青道路: 砖石铺砌路:绿化=49:11:14:26	0.57	文教区	人流量小、车流量小

* 本文径流系数估算依据《室外排水设计规范》(GB 50014 - 2006).



图1 苏州城区降雨径流采样监测点布局
Fig.1 Layout of rainfall runoff sampling sites in Suzhou

1.2 样品采集与分析

为确定苏州城区雨水径流对受纳水体重金属污染的贡献率,本文的调查分析工作重点放在终端采样,在接近排水系统出口的窨井采集径流样品,在形成径流后按初密后疏时间间隔采集径流水质过程线样品,一般采样间隔在 5~20 min. 样品采集于 2018 年 6 月开始进行,采集的水样置于聚乙烯瓶中并运回实验室于 4℃ 保存,尽快完成样品分析.

除收集径流雨水外,在晴天对 4 种用地类型的不透水路面进行颗粒物收集. 使用尼龙毛刷采集路面颗粒物,装入聚乙烯自封袋带回实验室. 每个监测点以多点采样的方法组成混合样.

根据《水和废水监测分析方法》(第四版)^[24],通过火焰原子吸收分光光度计(AA6300 型,岛津(上海)实验器材有限公司)测定 Cu、Zn 和 Pb 的重金属浓度.

首先对采集的雨水样和路面颗粒进行不同的预处理:对过滤前后的径流水样及路面颗粒物(总态)进行加酸消解,采用 Tessier^[25] 于 1945 年提出的化学试剂分部提取法对路面颗粒物进行预处理. 经由上述不同的预处理之后,用火焰原子吸收分光光度计测定,分别获得径流水样中总重金属浓度、溶解态重金属含量、颗粒物中总重金属浓度、颗粒物中水溶态和弱酸提取态的重金属浓度. 其中,Cu、Pb 浓度的测定采用 APDC-MIBK 萃取火焰原子吸收法,Zn 浓度的测定采用直接吸入火焰原子吸收法.

1.3 重金属生态风险评价

本研究采用《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002)、物种敏感性分布法(SSD)以及风险商(RQ)对重金属的生态风险进行评价. 采用图 2 所示的技术路线进行研究.

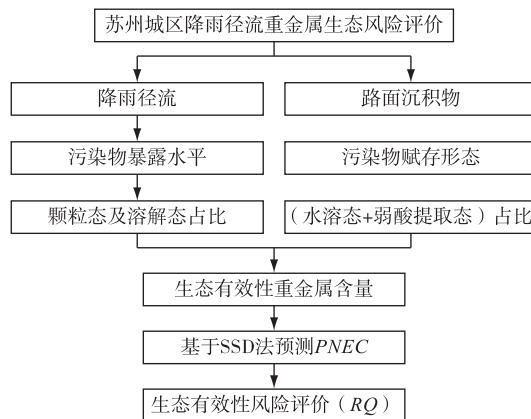


图 2 降雨径流重金属生态风险评价流程

Fig.2 Ecological risk assessment process of heavy metals in rainfall runoff

根据《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002),按地表水水域环境功能和保护目标的要求由高到低地,将水质依次分为 5 类,标准值见表 2.

本文参考的毒理数据、评价物种数量、 HC_5 值源自刘昔等^[26]构建的 Cu、Zn、Pb 的 SSD 曲线. 该研究采用的重金属急性毒理数据源于美国 EPA ECTOX 数据库 (<http://www.epa.gov/ecotox>),其中 Cu、Zn 和 Pb 的毒理数据数量分别为 16、21、21 个. 选择全部物种(不分组)的数据进行拟合 SSD 曲线,物种包括藻类、鱼类、甲壳类、软体动物、蠕虫以及其他无脊椎动物. 根据刘昔等^[26]的研究结果,分别获得第 5 百分位点所对应的毒性浓度(hazard concentration, HC_5),其意义为可保证生态系统中 95% 的物种不受影响的最大污染物浓度^[27]. 预测无效应浓度(PNEC)为 HC_5 与评价

表 2 国家《地表水环境质量标准》中重金属浓度的标准值(mg/L)

Tab.2 Criteria of Cu, Zn and Pb concentration in Surface Water Environmental Quality Standard of China

重金属浓度	I 类	II 类	III 类	IV 类	V 类
Cu ≤	0.01	1.0	1.0	1.0	1.0
Zn ≤	0.05	1.0	1.0	2.0	2.0
Pb ≤	0.01	0.01	0.05	0.05	0.1

因子 (assessment factor, AF) 的比值. 根据欧盟风险评价技术指南^[28] 确定合适的 AF 取值, 本文根据所选取的 SSD 曲线中包含的物种数量、毒性数据及模型拟合的优势度, 取 $AF=2$.

$$PNEC = HC_5 / AF \quad (1)$$

RQ 是实测环境浓度 (measure environment concentration, MEC) 与 $PNEC$ 的比值, 其比值大小决定生态风险影响程度^[29]. $RQ < 0.1$ 为低等生态风险; $0.1 \leq RQ \leq 1$ 为中等生态风险; $RQ > 1$ 为高等生态风险. 在降雨径流过程中, 用事件平均浓度 (event mean concentration, EMC) 值作为实测环境浓度 (MEC), 更能代表整个区域降雨过程的情况. 考虑到采集的径流水样中掺杂着路面颗粒物且重金属不同的赋存形态对水生生物的影响差异, 仅以径流水样中总重金属浓度来计算生态风险是片面的. 而存在于径流水样中水相的重金属易被生物摄取并利用, 且颗粒物中以水溶态与弱酸提取态形式存在的重金属由于其键合微弱, 易于与上层水体交换, 同样也具有生物有效性. 因此, 为有效的体现径流水样中重金属的生态风险, 选取具有生态有效性的重金属含量 (MEC_E), 即 MEC_E 由以下部分组成: 溶解态重金属含量及以水溶态和弱酸提取态形式存在的颗粒态重金属含量.

$$RQ = MEC_E / PNEC \quad (2)$$

$$MEC_E = \text{溶解态}\% \cdot EMC + \text{颗粒态}\% \cdot EMC \frac{\text{水溶态} + \text{弱酸提取态}}{\text{总量}} \quad (3)$$

1.4 统计分析

本研究中的数据统计与分析工作主要依靠 Microsoft Office Excel 2007 等软件来完成, 采样点示意图、图表则利用 ArcGIS Desktop 9.3、Adobe PhotoShop CS6 及 Origin 9.0 绘制而成. 本研究共获得 6 次有效降雨事件, 分别为降雨事件 20180620、20180704、20180722、20181202、20190115 及降雨事件 20190227.

2 结果与讨论

2.1 降雨径流污染水平分析

2.1.1 重金属浓度及分布特征 对全部监测点重金属浓度进行对数正态分布检验, 检验结果如图 3. 由图 3 可知, 不同重金属的对数概率均分布在 95% 置信区间内, 呈现出较好的线性分布, 表明径流重金属 EMC 浓度具有较好的对数正态分布性, 具备按统计方法使用中值或平均值分析讨论的基础. 剔除降雨事件 20180704 中在彩香二村采集的径流水样中 Pb 的异常值后, 在采集的 6 次有效降雨事件中, 彩香二村 (住宅区)、环境楼 (文教区)、肖家巷 (历史文化保护区) 和阔巷 (商业区) 监测点的采样频次高、数据齐全有效, 能有效代表 4 种用地类型的降雨径流情况. 因此, 后续的分析以上述监测点的结果为主.

降雨产生径流的前提就是接触集水面, 不同用地类型上的集水面的材质和性质差异较大, 这是影响重金属浓度的关键因素. 由图 4 的统计结果可见, Cu 、 Pb 和 Zn 浓度在不同用地类型内的分布存在一定差异. 其中, Cu 浓度较高的位点集中在阔巷 (商业区), 其次为肖家巷 (历史文化保护区), 在彩香二村 (住宅区) 以及环境学院 (文教区) 分布较少; Pb 的高污染区位于阔巷, 在其余 3 处监测点的浓度较低; Zn 的高污染区集中于肖家巷与阔巷, 在彩香二村及环境学院的浓度较低. 经比较得, 阔巷受重金属污染程度最为严重, 其余 3 处监测点均不同程度受到不同重金属的污染.

按照我国《地表水环境质量标准》(表 2), 以单次有效降雨事件统计, Cu 浓度普遍较低, 4 个监测点处于 I 类水质和 II 类水质的比例各占 50%; Zn 浓度与 Cu 浓度大致相同, 较集中于 II 类水质 (54%); 而 Pb 浓度变化较大, 从 I 类水质至劣 V 类水质均有涉及, 特别是在降雨事件 20190115 的雨水径流水样中, Pb 浓度普遍较高. 但若以统计结果的平均值为基础, 可以发现在苏州城区的 4 个典型用地类型监测点中, Zn 、 Cu 浓度符合 II 类水质标准; Pb 浓度超过 V 类水质标准, 其中, 阔巷的 Pb 浓度最高.

2.1.2 重金属赋存形式 以 EMC 值为基础计算各监测点收集的径流样品中重金属浓度的分布特征. 如图 5 所示, 综合来看, 重金属 Zn 污染物多以颗粒态存在, Cu 和 Pb 的分布无明显规律.

虽然 4 处监测点中道路面积仅占监测点汇水面积的 28.25% 左右, 但其降雨径流对水环境的重金属浓度的贡献率达 35% ~ 75%^[30]. 路面灰尘来源广泛, 成分复杂且往往有多种赋存形态. 通过测定路面颗粒中的水溶态及弱酸提取态, 可更精确评价降雨径流中重金属对水环境的生态风险. 表 3 为各用地类型路面沉积物

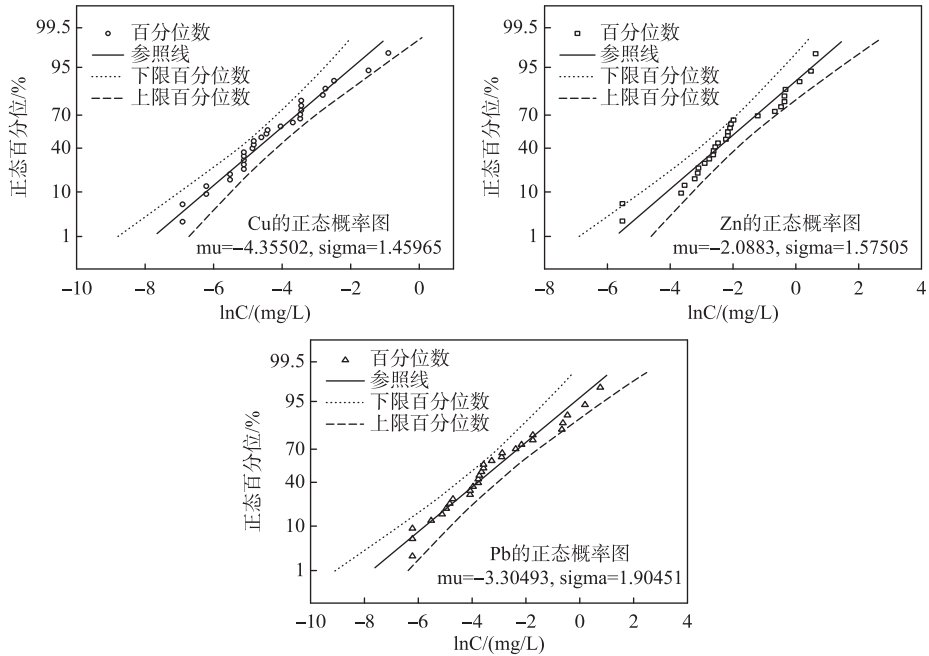


图 3 不同重金属对数正态概率分布

Fig.3 Lognormal probability distribution of different heavy metals

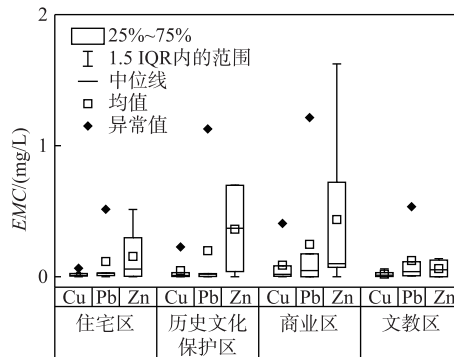


图 4 典型用地类型监测点重金属 EMC 值($n=71$)

Fig.4 The EMC values of heavy metals in different land use types ($n=71$)

中重金属的形态分布结果,由数据可知,单位质量的颗粒物中重金属含量的一般规律为 $Pb > Zn > Cu$,但单位质量的颗粒物中具有生物有效性的重金属含量为 $Zn > Pb > Cu$ 。

2.2 用地类型对径流雨水重金属的贡献研究

径流雨水中重金属来源分为自然源和包括城市发展建设、交通污染及生活污染的人为源。据《苏州市2018年环境质量公报》显示环境空气质量持续改善,苏州市区空气质量优良天数比率为73.7%,因此由大气沉降等自然方式造成的降雨径流中重金属含量占比较低。Gunatilake等^[31]通过使用地质和生物污染指标法的多种记录来评估科伦坡市(CMR)的污染程度,表明人为活动是城市重金属的主要来源。

根据国内外的研究报道,城市降雨径流重金属来源主要是地面交通活动和屋面。其中,地面交通活动造成的影响主要体现在汽车尾气排放、车体自身磨损、路面材料老化及建筑扬尘等^[32],Goonetilleke等^[33]发现

表 3 各用地类型中颗粒物的重金属赋存形态(mg/g)

Tab.3 The existing state of heavy metals in the particulate matter in different land use types

污染物	赋存形态	彩(住宅区)	环(文教区)	肖(历史文化保护区)	阔(商业区)	总量
Cu	水溶态	0	0	0	0	0
	弱酸提取态	0	0	0	0.0068	0.0068
	总量	0.3366	0.4122	0.2945	1.3262	2.3695
Zn	水溶态	0	0	0	0	0
	弱酸提取态	0.2994	0.5062	0.2555	0.0725	1.1336
	总量	1.2685	3.3106	1.4002	0.6208	6.6001
Pb	水溶态	0.0079	0.0099	0.0075	0.0099	0.0352
	弱酸提取态	0.1987	0.0897	0.0559	0.0897	0.4340
	总量	6.3469	1.1985	2.2425	1.1985	10.986

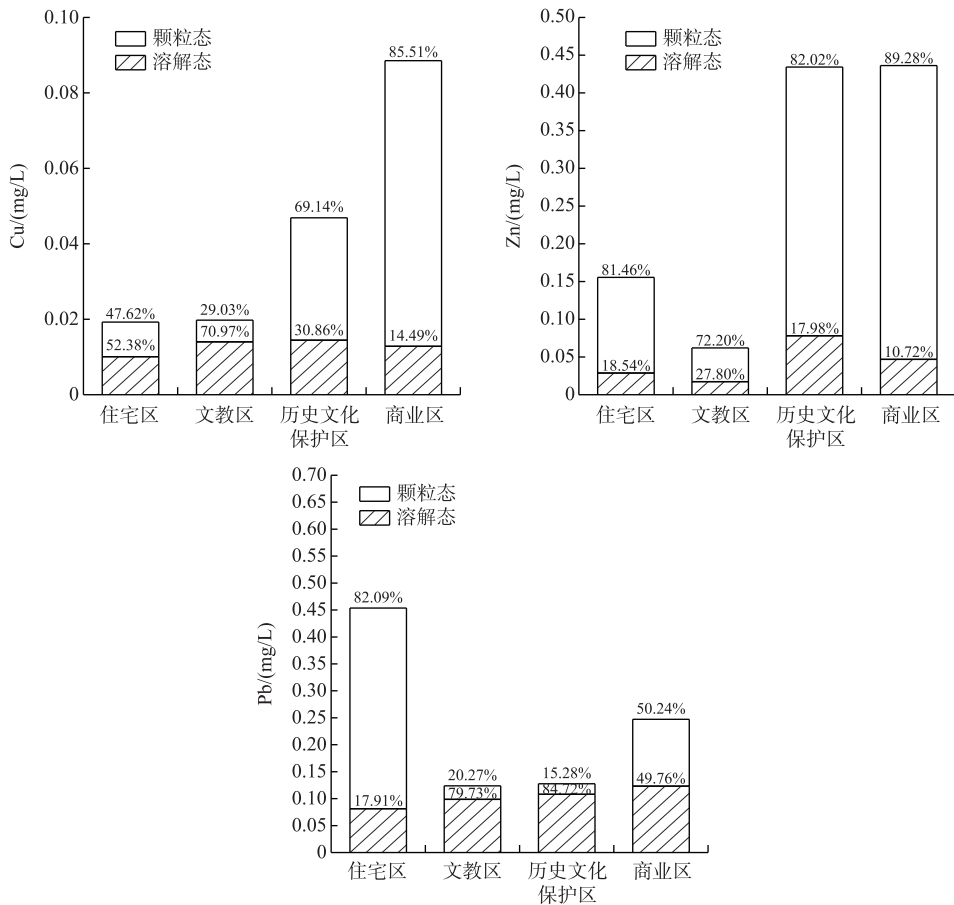


图 5 不同重金属平均浓度及存在形式占比

Fig.5 The average concentrations and proportions of different heavy metals

在道路粉尘中含有大量因轮胎磨损而导致表面粗糙的细长颗粒,通过电镜扫描和元素能谱分析进一步表明,这些颗粒中含有铁、铜、锌、镍、铅等重金属元素。而来自于屋面径流的重金属含量主要受大气降尘及屋面材料腐蚀的影响^[34]。周舒宇等^[35]对南京市不同下垫面的降雨水质进行分析,得出重金属污染顺序为:天

然降雨<屋面(瓦房)<屋面(油毡)<住宅区机动车道<交通区机动车道. 表4列出了国内对屋面径流重金属含量的监测结果,这些数据均表明屋面材料对屋面径流中重金属浓度的差异影响显著,且屋面雨水径流对Zn的贡献较大,而对Cu和Pb的贡献较小. 王闯等^[36]的研究归结出:重金属Pb和Zn在3种屋面径流中的平均浓度顺序为沥青瓦屋面>青瓦屋面>沥青屋面.

表4 国内屋面径流重金属含量检测结果*

Tab.4 Detection results of heavy metal content roof runoff in China

地点	单位	Cu	Zn	Pb
南京市屋面 ^[34]	μg/L	19.4	131.0	19.9
南京市瓦屋面 ^[35]	μg/L	—	15.3~27.9	8.3~12.4
南京市油毡屋面 ^[35]	μg/L	—	28.2~45.1	4.8~18.1
深圳市混凝土屋面 ^[37]	mg/kg	164.1	1124.8	212.2
深圳市沥青屋面 ^[37]	mg/kg	184.1	1087.1	195.5
北京市沥青油毡屋面 ^[38]	mg/L	0.0120	0.0630	0.0166
北京市沥青油毡 ^[39]	mg/L	0.012	0.144	0.006

* “—”代表原文献中不包含该类指标.

不同用地类型的监测点,其人口密度、交通状况、下垫面特征差异较大,从而导致重金属分布差异较大. 阔巷(商业区)处于地面交通及人类活动最频繁的地段,其清扫方式主要为人工清扫和高压水枪对路面进行冲洗,其重金属污染情况最高. 一方面来自商业区的装修材料,涂料、卷材、油漆等,另一方面,繁华拥挤的商业区对机动车行驶带来严重的阻碍,频繁刹车使得轮胎磨损、刹车组件磨损及燃烧废气的增加. Hjortenkrans 等^[40]的报告称,在有红绿灯、环形路和十字路口等典型的减速环境中,道路沉积物中Cu的浓度是背景水平的8倍多. 环境学院(文教区)、彩香二村(居住区)监测点车流量较少,总体污染程度不高,但因二者均在停车场附近,导致部分水样中重金属浓度偏高. 肖家巷(历史文化保护区)内部道路狭窄,无机动车辆通行,但由于其路面主要为青石板路,砖石缝隙之间易于藏纳颗粒,因此人工清扫模式无法有效清除含重金属的颗粒;且作为历史文化保护区监测点的肖家巷,76%的降雨径流面积为瓦屋面,而其他3种用地类型的屋面多为沥青屋面和混凝土屋面,这导致在肖家巷的径流水样中Zn的EMC平均值高达0.434 mg/L(图4).

2.3 生态风险评价结果比较

由SSD曲线获得各重金属的5%累积概率对应的浓度,Cu、Pb、Zn的 HC_5 值分别是2.09、12.59、31.62 μg/L^[26]. 本研究取 $AF=2$,则Cu、Pb、Zn的PNEC值分别是1.045、6.295、15.81 μg/L. 根据 HC_5 值与PNEC值的含义,两者的值越小,象征该有毒污染物潜在生态风险越大,淡水生物对其浓度的变化越敏感.

考虑到径流水样中重金属浓度分为溶解态和颗粒态两部分,而以颗粒态形式存在的重金属又有不同的赋存形态,其中水溶态和弱酸提取态迁移性强,易与上层水体相互交换,具有较强的生态有效性,因此在对降雨径流中的重金属浓度进行生态风险时,仅计算具有生态有效性的部分.

选取彩、环、肖、阔4个不同用地类型监测点,分别对20180620、20180704、20180722、20181202、20190115及20190227六场降雨事件的重金属进行RQ值运算,表5给出了RQ区间和平均值统计结果,图6为各监测点6次降雨事件的重金属Cu、Pb、Zn的RQ值.

从综合平均值来看,3种重金属的生态风险呈 $Zn < Cu < Pb$ 趋势,且不同重金属在不同用地类型的生态风险略有不同.

Cu的RQ值范围为0~62.01,在降雨事件20180704中各监测点的RQ值均 < 0.1 ,为低等生态风险;较高的RQ值主要集中在2018年12月2日至2019年2月27日的三场降雨,这可能是由于在这三场降雨采样期间的降雨量少及前期晴天数高等因素导致的地面累积污染物负荷高. Cu在各用地类型低、中、高生态风险的占比分别为占37%、17%和46%.

表 5 不同监测点重金属风险商(RQ)统计结果

Tab.5 Statistical results of risk quotient (RQ) of heavy metals at different monitoring sites

监测点	RQ(Cu)		RQ(Zn)		RQ(Pb)	
	范围	平均值	范围	平均值	范围	平均值
住宅区	0~48.33	9.65	0~13.51	3.72	0~72.65	15.58
文教区	0~55.60	13.41	0~4.24	1.52	0.11~80.12	16.00
历史文化保护区	0~62.01	13.84	0~25.94	9.05	0~100.95	17.26
商业区	0~59.12	12.65	0~19.46	5.83	0~116.01	21.19
综合平均		12.39		5.03		17.51

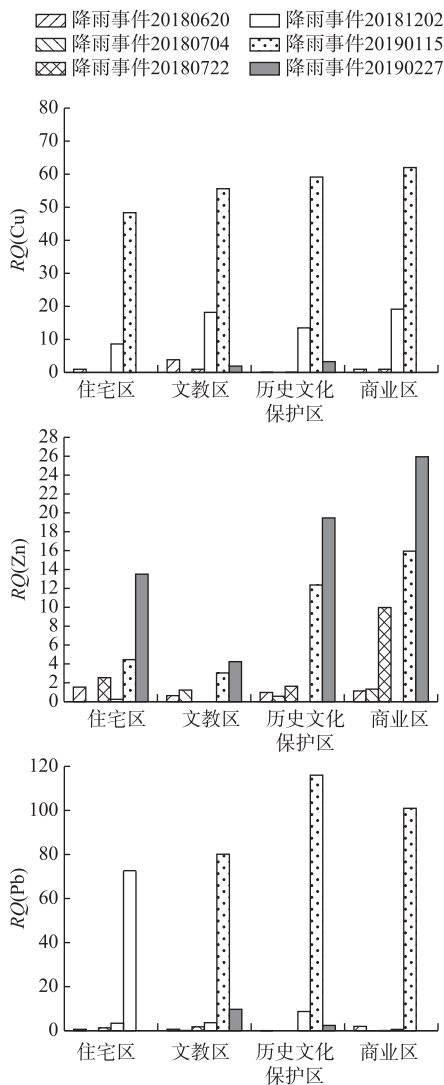


图 6 苏州城区典型用地类型监测点降雨事件雨水径流重金属的 RQ 值

Fig.6 RQ value of heavy metals in rainfall events in different land use types in Suzhou

Zn 的 RQ 值范围为 0~25.94,在 3 种重金属中表现为平均浓度最高但风险最低. 从柱状图可明显看出阔巷(商业区)及肖家巷(历史文化保护区)的生态风险较高,低等生态风险($RQ < 0.1$)的事件占 21%,17% 存在中等生态风险($0.1 \leq RQ \leq 1$),高等生态风险($RQ > 1$)事件占 62%.

Pb 的 RQ 值范围为 0~116.01,综合平均值为 17.51,在 3 种重金属中表现为风险最高. Pb 在各用地类型的高、中、低风险占比分别为 30%、18% 和 52%,且较高的 RQ 值也集中在 2018 年 12 月 2 日至 2019 年 2 月 27 日的三场降雨,这一规律与 Cu 相似.

采用基于 SSD 曲线的 HC_5 值结合风险商评价法进行重金属生态风险评价的结果显示,Cu、Zn 和 Pb 的 RQ 平均值分别为 12.39、5.03 和 17.51,重金属生态风险总体呈 $Zn < Cu < Pb$,表示 3 种重金属对水生生物均会造成高风险且生态风险依次升高. 然而在 2.1 节对径流样品重金属污染水平分析结果显示,Zn、Cu 浓度符合 II 类水质标准,据此认为我国《地表水环境质量标准》的制定未充分考虑生态影响,低估了部分金属的生态风险. 何佳等^[41]对我国八大流域水体中的 10 种典型重金属进行生态风险评估,结果显示,Cu、Zn 和 Pb 在各流域中均表现出较高的生态风险,其重金属含量超过 HC_5 (慢性毒性)的最高超标率分别为 88.7%、64.4%、65.5%,说明我国主要的流域水体中重金属污染状况比较严峻. 若在实际工程中,采用《地表水环境质量标准》(GB 3838-2002)来评价水体污染程度,可能会忽略重金属对水生生物的实际影响,造成中国水体长期处于亚健康状态.

大量径流雨水经过雨水管道收集最终汇入河道,目前已有学者^[15,26]对湖泊及海洋水质进行生态风险评价. 在刘昔等^[26]对中国 18 个湖泊水体中重金属污染的风险评价研究中表明:重金属 Cu 在多个湖泊中均存在潜在的生态风险;湖泊中的 Zn 浓度虽然保持较高水平,但对物种敏感性影响较低,生态风险较低;Pb 污染较大的湖泊主要位于经济发达地区,可能是含铅汽油使用量大造成的. 王宏伟等^[15]对天津渤海湾的生态风险评价结果显示,所有站位的 Cu 和 Zn 的 RQ 值均大于 1,存在高生态风险,Pb 的 RQ 值在 0.1~1.0 之间,

存在中等生态风险. 以上研究表明,水环境中的重金属浓度已达到会对水生生物产生不利影响的程度,降雨径流污染作为水体污染的主要来源之一,对水体中重金属污染有很大的贡献率,因此需要对发达城市径流雨水采取一定处理措施. 如:加强城市环境管理力度,加大对路面清扫的力度及频次;合理利用地表绿化,铺装透水路面材料;根据地形设置植草沟、滞留池等. 根据在不同用地类型的下垫面造成的径流雨水中所含污染物成分及占比不同,采用不同的处理方式降低降雨径流带来的环境污染,这也是此研究的实际意义所在.

3 结论

本文以苏州市不同用地类型作为研究区域,开展了研究区降雨径流样品重金属浓度及分布特征的分析,并根据《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002)、物种敏感性分布法(SSD)结合风险商(RQ)对具有生物有效性的重金属进行生态风险评价,主要得到以下结论:

1) 根据我国《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002),在苏州城区的4个典型用地类型监测点的径流水样中,Zn、Cu浓度符合Ⅱ类水质标准;Pb浓度均不符合Ⅴ类水质标准.

2) 以城市发展建设、交通污染及生活污染的人为源是影响苏州城区雨水径流重金属污染的关键因素. 土地利用类型的不同导致降雨径流中重金属分布差异较大. 繁华拥挤的商业区Cu、Pb、Zn污染程度最高;文教区和居住区总体污染程度较低;历史文化保护区的重金属Zn污染严重.

3) 基于SSD结合风险商(RQ)评价降雨径流中具有生物有效性的重金属危害,发现不同重金属在不同用地类型的生态风险略有不同;3种重金属的生态风险呈 $Zn < Cu < Pb$ 的趋势,且均会对水生生物造成高风险,认为我国《地表水环境质量标准》的制定未充分考虑生态影响,低估了部分金属的生态风险,需要加强城市环境管理力度.

4 参考文献

- [1] Sang GQ, Li M. Research on urban expansion based on RS and GIS: taking Suzhou as an example. *Geomatics & Spatial Information Technology*, 2019, **42**(9): 107-110. [桑国庆, 李苗. 基于RS和GIS的城镇扩张动态研究——以苏州市为例. 测绘与空间地理信息, 2019, **42**(9): 107-110.]
- [2] Xia HX, Chen F, Zhi L *et al.* Differential evaluation of urbanization development in Jiangsu Province based on super efficiency DEA model. *Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning*, 2014, **35**(2): 6-10. DOI: 10.7621/cjarrp.1005-9121.20140202. [夏后学, 陈方, 支玲等. 基于超效率DEA方法的江苏省城镇化发展差异评价. 中国农业资源与区划, 2014, **35**(2): 6-10.]
- [3] Yuan ZJ, Liang C, Li DQ. Progress and prospect of the study on sponge city in China. *Ecology and Environment Sciences*, 2017, **26**(5): 896-901. [袁再健, 梁晨, 李定强. 中国海绵城市研究进展与展望. 生态环境学报, 2017, **26**(5): 896-901.]
- [4] Zhang LW. Construction and practice of sponge city in China. *Water & Wastewater Engineering*, 2018, **44**(11): 1-5. [章林伟. 中国海绵城市建设与实践. 给水排水, 2018, **44**(11): 1-5.]
- [5] Liang LW, Wang ZB, Li JX. The effect of urbanization on environmental pollution in rapidly developing urban agglomerations. *Journal of Cleaner Production*, 2019, **237**: 1-15.
- [6] Song XS, Chen Y, Zhang N. Influences of urban development on meteorological environment: A case study of Suzhou, eastern China. *Journal of Nanjing University: Natural Sciences*, 2011, **47**(1): 51-59. [宋迅殊, 陈燕, 张宁. 城市发展对区域气象环境影响的数值模拟: 以苏州为例. 南京大学学报: 自然科学版, 2011, **47**(1): 51-59.]
- [7] Wang YZ, Duan XJ, Yang QK *et al.* Spatial-temporal characteristics and driving factors of urban construction land in Jiangsu Province in the last 30 years. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2019, **28**(7): 1531-1540. DOI: 10.11870/cjlyzyhj201907003. [王雅竹, 段学军, 杨清可等. 近30年江苏省建设用地扩张的时空特征、模式与驱动因素研究. 长江流域资源与环境, 2019, **28**(7): 1531-1540.]
- [8] Luo ZY, Wang ZB. Analysis of the impact of urban economic development on environmental quality—based on the respective of Suzhou industrial production system. *China Statistics*, 2009, (9): 24-26. [罗正英, 王志斌. 城市经济发展对环境质量影响分析——基于苏州工业生产体系的视角. 中国统计, 2009, (9): 24-26.]
- [9] Fang CL. The urbanization and urban development in China after the reform and opening-up. *Economic Geography*, 2009,

- 29(1): 19-25. [方创琳. 改革开放30年来中国的城市化与城镇发展. 经济地理, 2009, 29(1): 19-25.]
- [10] O'Sullivan AD, Charters FJ, Cochrane TA *et al.* A novel modelling framework to prioritize estimation of non-point source pollution parameters for quantifying pollutant origin and discharge in urban catchments. *Journal of Environmental Management*, 2016, 167: 75-84.
- [11] Ke ZP. The migration and transformation pathway of heavy metals in water and its influencing factors. *Urban Construction Theory Research (Electronic Version)*, 2012, (30). [柯志平. 水体中重金属的迁移转化途径及影响因素. 城市建设理论研究(电子版), 2012, (30).]
- [12] Wang LP, Lei K, Qiao YZ. Distribution and ecological risk assessment of four common metals in coastal sediment of Bohai bay along Tianjin. *Marine Environmental Science*, 2017, 36(5): 693-698. [王丽平, 雷坤, 乔艳珍. 天津渤海湾近岸海域沉积物中4种常见重金属的分布及其风险分析. 海洋环境科学, 2017, 36(5): 693-698.]
- [13] Liu QQ, Meng FP, Lin YC. Study on bioavailability and ecological risk assessment of heavy metals in sediments of Jiaozhou Bay. *Periodical of Ocean University of China*, 2019, 49(5): 35-44. [刘群群, 孟范平, 林怡辰. 胶州湾沉积物重金属生物可利用性及生态风险评价. 中国海洋大学学报: 自然科学版, 2019, 49(5): 35-44.]
- [14] Cao R, Zbbi·Simayi, Si Q. Evaluation of heavy metals pollution and ecological risk of farmland soils in north Urumqi of Xinjiang. *Journal of Agricultural University of Hebei*, 2019, 42(3): 57-63. [曹冉, 孜比布拉·司马义, 斯琴. 乌鲁木齐市北郊农田土壤重金属污染及生态风险评价. 河北农业大学学报, 2019, 42(3): 57-63.]
- [15] Wang HW, Qiao YZ, Wang LP. Distribution and ecological risk of four heavy metals in the Tianjin coastal area of Bohai bay, China. *Journal of Hydroecology*, 2017, 38(2): 38-43. [王宏伟, 乔艳珍, 王丽平. 天津渤海湾4种重金属的分布及生态风险评价. 水生态学杂志, 2017, 38(2): 38-43.]
- [16] Du JG, Zhao JY, Chen B *et al.* Assessing ecological risks of heavy metals to marine organisms by species sensitivity distributions. *Asian Journal of Ecotoxicology*, 2013, 8(4): 561-570. DOI: 10.7524/AJE.1673-5897.20120525007. [杜建国, 赵佳懿, 陈彬等. 应用物种敏感性分布评估重金属对海洋生物的生态风险. 生态毒理学报, 2013, 8(4): 561-570.]
- [17] Kong XZ, He W, Qin N *et al.* Assessing acute ecological risks of heavy metals to freshwater organisms by species sensitivity distributions. *China Environmental Science*, 2011, 31(9): 1555-1562. [孔祥臻, 何伟, 秦宁等. 重金属对淡水生物生态风险的物种敏感性分布评估. 中国环境科学, 2011, 31(9): 1555-1562.]
- [18] Ma YB, Li XG, Ding CF *et al.* Determination and validation of soil thresholds for cadmium based on food quality standard and health risk assessment. *Science of the Total Environment*, 2018, 619/620: 700-706.
- [19] Mu JL, Wang Y, Wang JY. Preliminary analysis on feasibility and applicability of using freshwater data to extrapolate the saltwater marine quality criteria. *Marine Environmental Science*, 2012, 31(1): 92-96. [穆景利, 王莹, 王菊英. 应用淡水生物毒性数据推导海水水质标准的可行性及适用性初探. 海洋环境科学, 2012, 31(1): 92-96.]
- [20] Li Z, He HQ, Zhang TX *et al.* Sensitivity evaluation of acute toxic species of typical benthic loach. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2019, 35(3): 392-397. [李政, 何欢祺, 张天旭等. 典型底栖生物泥鳅的急性毒性物种敏感性评价. 生态与农村环境学报, 2019, 35(3): 392-397.]
- [21] Zhang YH, Du P, He Y *et al.* Derivation of the thresholds of available concentrations of heavy metals in soil based on agricultural product safety. *Environmental Science*, 2019, 40(9): 4262-4269. DOI: 10.13227/j.hjxx.201901196. [张云慧, 杜平, 何赢等. 基于农产品安全的土壤重金属有效态含量限值推定方法. 环境科学, 2019, 40(9): 4262-4269.]
- [22] Orgilbold M, Masayuki K, Bolormaa O *et al.* Impact of land uses on heavy metal distribution in the Selenga River system in Mongolia. *Environmental Earth Sciences*, 2017, 76(9).
- [23] Meng F, Liu M, Hou LJ *et al.* Heavy metals in urban dusts and soils of Shanghai and its pollution assessment. *Journal of East China Normal University: Natural Science*, 2007, (4): 56-63. [孟飞, 刘敏, 候立军等. 上海中心城区地表灰尘与土壤中重金属累积及污染评价. 华东师范大学学报: 自然科学版, 2007, (4): 56-63.]
- [24] Editorial Board of Water and Wastewater Monitoring and Analysis Methods, Ministry of Environmental Protection of the People's Republic of China eds. *Water and Wastewater Monitoring and Analysis Methods*; 4th edition. Beijing: China Environmental Science Press, 2002: 324. [国家环境保护总局《水和废水监测分析方法》编委会. 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: 324.]
- [25] Tessier A, Campbell PGC, Bisson M. Sequential extraction procedure for the speciation of particular trace elements. *Environmental Technology*, 1979, 15(1): 844-850.

- [26] Liu X, Wang Z, Wang XL *et al.* Ecological risks assessment of selected heavy metals in the waters of Chinese lakes based on species sensitivity distributions. *J Lake Sci*, 2018, **30**(5): 1206-1217. DOI: 10.18307/2018.0504. [刘昔, 王智, 王学雷等. 应用物种敏感性分布评价中国湖泊水体中重金属污染的生态风险. 湖泊科学, 2018, **30**(5): 1206-1217.]
- [27] Wheeler JR, Grist EPM, Leung KMY *et al.* Species sensitivity distributions: data and model choice. *Marine Pollution Bulletin*, 2002, **45**(1).
- [28] European Commission. Technical Guidance Document on risk assessment in support of Commission Directive 93/67/EEC on risk assessment for new notified substances, Commission Regulation (EC) No 1488/94 on risk assessment for existing substances. Luxembourg: Office for Official Publications of the European Communities, 2003.
- [29] Verlicchi P, Petrovic M, Galletti A *et al.* Hospital effluent: Investigation of the concentrations and distribution of pharmaceuticals and environmental risk assessment. *Science of the Total Environment*, 2012, **430**: 109-118.
- [30] Sezgin N, Ozcan HK, Demir G *et al.* Determination of heavy metal concentrations in street dusts in Istanbul E-5 highway. *Environment International*, 2004, **29**(7): 979-985.
- [31] Gunatilake J, Amarasooriya P, Iqbal MCM *et al.* Using multiple methods to assess heavy metal pollution in an urban city. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2018, **190**(11): 657.1-657.15.
- [32] Fang FM, Lin YS, Wang HD *et al.* Source, exposure characteristics and its environmental effect of heavy metals in urban surface dust. *Acta Ecologica Sinica*, 2011, **31**(23): 7301-7310. [方凤满, 林跃胜, 王海东等. 城市地表灰尘中重金属的来源、暴露特征及其环境效应. 生态学报, 2011, **31**(23): 7301-7310.]
- [33] Goonetilleke A, Kokot S, Egodawatta P *et al.* Source characterisation of road dust based on chemical and mineralogical composition. *Chemosphere: Environmental Toxicology and Risk Assessment*, 2012, **87**(2): 163-170.
- [34] Zhang KF, Li H, Fu DF *et al.* Characteristics of heavy metal pollution in runoff from three different types of roofs. *Journal of Environmental Science*, 2011, **31**(4): 724-730. [张科峰, 李贺, 傅大放等. 三种不同屋面雨水径流重金属污染特性及影响因素分析. 环境科学学报, 2011, **31**(4): 724-730.]
- [35] Zhou SY, Luo H, Zhao C. Analysis on rainwater quality of rainy season in Nanjing. *Forest Engineering*, 2017, **33**(2): 60-63, 87. [周舒宇, 骆辉, 赵尘. 南京市梅雨期雨水水质特性分析. 森林工程, 2017, **33**(2): 60-63, 87.]
- [36] Wang S, Li M, Zhang LQ *et al.* Characteristics analysis of heavy metal pollution in runoff from different types of roof. *Urban Environment & Urban Ecology*, 2015, **28**(3): 35-38. [王闪, 李敏, 张立秋. 不同屋面材料径流过程中重金属的污染特征. 城市环境与城市生态, 2015, **28**(3): 35-38.]
- [37] Li DZ, Guan YT, Liu A *et al.* Distribution and risk assessment of heavy metal dust in typical material room area. *Environmental Science*, 2015, (9): 3269-3277. DOI: 10.13227/j.hjxx.2015.09.019. [李敦柱, 管运涛, 刘安等. 典型材料屋面面积尘重金属形态分布与风险评估. 环境科学, 2015, (9): 3269-3277.]
- [38] Ren YF, Wang XK, Ouyang ZY *et al.* Research on variations of asphalt felt roof runoff pollutant concentrations during the rainfall. *Journal of Environmental Science*, 2006, **26**(4): 601-606. [任玉芬, 王效科, 欧阳志云等. 沥青油毡屋面降雨径流污染物浓度历时变化研究. 环境科学学报, 2006, **26**(4): 601-606.]
- [39] Hou PQ, Ren YF, Wang XK *et al.* Research on evaluation of water quality of Beijing urban stormwater runoff. *Environmental Science*, 2012, **33**(1): 71-75. [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.]
- [40] Hjortenkrans D, Bergbäck B, Häggerud A. New metal emission patterns in road traffic environments. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2006, **117**(1/2/3): 85-98.
- [41] He J, Shi D, Wang BB *et al.* Ecological risk assessment and water quality standard evaluation of 10 typical metals in eight basins in China. *China Environmental Science*, 2019, **39**(7): 2970-2982. [何佳, 时迪, 王贝贝等. 10种典型重金属在八大流域的生态风险及水质标准评价. 中国环境科学, 2019, **39**(7): 2970-2982.]