

 方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV
HUANJING KEXUE

- 主办 中国科学院生态环境研究中心
- 出版 科学出版社



2019

Vol.40 No.3
第40卷 第3期

目次

2014~2017北京市气象条件和人为排放变化对空气质量改善的贡献评估.....尹晓梅,李梓铭,熊亚军,乔林,邱雨露,孙兆彬,寇星霞(1011)

利用多元线性回归方法评估气象条件和控制措施对APEC期间北京空气质量的影响.....李颖若,汪君霞,韩婷婷,王焱,何迪,权维俊,马志强(1024)

京津冀郊区站点秋冬季大气PM_{2.5}来源解析.....王彤,华阳,许庆成,王书肖(1035)

四川省典型工业行业PM_{2.5}成分谱分析.....冯小琼,陈军辉,熊文朋,梅林德,徐雪梅,尹寒梅,范武波,姜涛,钱骏,叶宏(1043)

典型物流城市2016年冬季2次污染过程PM_{2.5}污染特征及来源解析.....赵雪艳,杨文,王静,刘盈盈,白雯宇,徐艳萍,王歆华,白志鹏(1052)

沈阳市采暖期与非采暖期空气PM_{2.5}污染特征及来源分析.....张显,田莎莎,刘盈盈,赵雪艳,余浩,张辉,陈莉,王歆华(1062)

新乡冬季PM_{2.5}中金属元素与水溶性离子年际变化及其来源解析.....闫广轩,雷豪杰,张靖雯,唐明双,张佳羽,曹治国,李云蓓,王跃思,樊静,李虎(1071)

烟台市环境受体PM_{2.5}四季污染特征与来源解析.....刘童,王晓军,陈倩,温杰,黄渤,朱红霞,田瑛泽,冯银厂(1082)

常州市冬季PM_{2.5}中类腐殖质昼夜特征分析.....顾远,李清,黄雯倩,赵竹子,马帅帅,叶招莲(1091)

西北某电子垃圾拆解厂室内外重金属污染特征及暴露风险.....曹红梅,赵留元,穆熙,李尧捷,毛潇萱,黄韬,马建民,高宏(1101)

京津冀一次污染过程的星地同步动态监测分析.....邱昀,李令军,姜磊,王新辉,赵文慧,张立坤,鹿海峰(1111)

中国城市O₃浓度时空变化特征及驱动因素.....黄小刚,赵景波,曹军骥,宋永永(1120)

基于卫星和地面观测的2013年以来我国臭氧时空分布及变化特征.....张倩倩,张兴赢(1132)

舟山市臭氧污染分布特征及来源解析.....王俏丽,董敏丽,李素静,吴成志,王刚,陈必新,李伟,高翔,叶荣民(1143)

中国建筑涂料使用VOCs排放因子及排放清单的建立.....高美平,邵霞,聂磊,王海林,安小栓(1152)

异戊二烯和甲苯二次有机硫踪物的臭氧非均相氧化.....黄亚娟,曹罡,朱荣淑,欧阳峰(1163)

兰州市农牧业源氨排放清单及其时空分布特征.....栗世学,郭文凯,何昕,朱玉凡,陈强(1172)

成都次降水稳定氢氧同位素特征及水汽来源分析.....胡月,刘国东,孟玉川,张文江,夏成城(1179)

基于TBL模型的闽江口围垦养虾塘水-大气界面CO₂扩散通量估算.....张逸飞,杨平,赵光辉,李玲,谭立山,全川(1188)

渤海和北黄海有色溶解有机物(CDOM)的分布特征和季节变化.....刘兆冰,梁文健,秦礼萍,唐建辉(1198)

思林水库荧光溶解性有机质的特征、来源及其转化动力学.....劳心宇,原杰,刘瑜, Khan M. G. Mostofa(1209)

厦门湾海滩微塑料污染特征.....刘启明,梁海涛,锡桂莉,胡欣,葛健(1217)

高分辨率监测下的漓江省里断面生物地球化学特征分析.....王奇岗,肖琼,赵海娟,王健力,郭永丽,张清华(1222)

鲜水河断裂带拉花盆地地下水化学特征及控制因素.....何锦,张幼宽,赵雨晴,韩双宝,刘元晴,张涛(1236)

成都市锦江表层水和沉积物中有机磷酸酯的污染特征.....吴迪,印红玲,李世平,王增武,邓旭,罗怡,罗林(1245)

丹江口库区表层浮游细菌群落组成与PICRUS1功能预测分析.....张菲,田伟,孙峰,陈彦,丁传雨,庞发虎,姚伦广,李玉英,陈兆进(1252)

蓝藻水华对太湖水柱反硝化作用的影响.....刘志迎,许海,詹旭,朱广伟,秦伯强,张运林(1261)

基于微生物生物完整性指数的城市河道生态系统健康评价.....苏瑛,许育新,安文浩,王云龙,何振超,楼颖雯,沈阿林(1270)

生物炭添加对湿地植物菖蒲根系通气组织和根系泌氧的影响.....黄磊,梁根坤,梁岩,罗星,陈玉成(1280)

城市不同材料屋面径流的污染负荷特性.....何湖滨,陈诚,林育青,严晗璐,董建玮,陈求稳(1287)

BiOCl-(NH₄)₃PW₁₂O₄₀复合光催化剂制备及其光催化降解污染物机制.....张文海,吉庆华,兰华春,李静(1295)

微米铁复合生物碳源对地下水中1,2-二氯乙烷的高效去除.....吴乃瑾,宋云,魏文侠,王海见,孙仲平(1302)

鸟粪石天然沸石复合材料对水中铅离子的去除.....邓曼君,王学江,成雪君,景焕平,赵建夫(1310)

Ca/Mg负载改性渣渣生物炭对水中磷的吸附特性.....易蔓,李婷婷,李海红,黄巧,杨金娥,陈玉成,杨志敏(1318)

两种生物炭的制备及其对水溶液中四环素去除的影响因素.....程扬,沈启斌,刘子丹,杨小莹,张太平,廖志钟(1328)

静止和水动力扰动状态下铅改性沸石添加对河道底泥磷迁移转化的影响.....俞阳,林建伟,詹艳慧,何思琪,吴小龙,王艳,赵钰颖,林莹,刘鹏茜(1337)

4种磺胺类药物及乙酰化代谢物在污水处理厂的去及机制.....王大鹏,张烟,颜昌宙(1347)

以膜分离为主的物化法对城市污水中污染因子的去除特性分析.....徐婷,李勇,朱怡嘉,薛梦婷,汤同欢(1353)

进水氨氮浓度对生物除磷颗粒系统的影响.....李冬,曹美忠,郭跃洲,梅宁,李帅,张杰(1360)

除磷亚硝化颗粒工艺启动及性能恢复.....李海玲,李冬,张杰,刘博(1367)

CAST工艺高温短程硝化的实现及其除磷性能.....马娟,杨蕊春,俞小军,周猛,陈永志(1375)

不同曝气量和好氧时间下SPNDPR系统处理低C/N城市污水的脱氮除磷性能.....袁梦飞,于德爽,巩秀珍,王晓霞,陈光辉,杜世明,甄建园(1382)

ABR除碳-亚硝化耦合厌氧氨氧化处理城市污水.....李田,曹家炜,谢凤莲,沈耀良,吴鹏,宋吟玲(1390)

室温低氨氮基质单级自养脱氮颗粒污泥启动效能与污泥特性.....谢璐琳,王建芳,钱飞跃,张泽宇,沈耀良,齐泽坤(1396)

不同种泥的厌氧氨氧化反应器的启动及动力学特征.....任君怡,陈林艺,李慧春,秦玉洁,王雁,王桐屿,周少奇(1405)

降温过程中生物膜CANON反应器的运行特征.....付昆明,廖敏辉,周厚田,付巢,姜娜,仇付国,曹秀芳(1412)

IEM-UF同步分离反硝化系统脱氮特性及种群结构分析.....刘子奇,张岩,马翔山,张博康,曹孟京,陈昌明(1419)

温度对硝化杆菌(Nitrobacter)活性动力学影响.....于雪,孙洪伟,李维维,祁国平,马娟,陈永志,吕心涛(1426)

零价铁和微波预处理组合强化污泥厌氧消化.....牛雨彤,刘吉宝,马爽,李亚明,解立平,魏源送,孟晓山(1431)

牛粪堆肥系统环境因子对抗性基因的影响.....彭磊,王科,谷月,王爱杰(1439)

环境因子对土壤微生物呼吸及其温度敏感性变化特征的影响.....张彦军,郭胜利(1446)

三峡库区典型微生物土壤呼吸及其组分对模拟酸雨的反应.....李一凡,王玉杰,王彬,王云琦(1457)

三峡库区柑橘园施肥量对土壤氮淋失及残留量的影响.....王甜,黄志霖,曾立雄,肖文发,宋文梅(1468)

长期施肥下水稻根际和非根际土壤微生物碳源利用特征.....宁赵,程爱武,唐海明,葛体达,邓扬悟,苏以荣,陈香碧(1475)

不同碳负荷梯度下稻田土壤有机碳矿化特征.....童瑶瑶,王季斐,祝贞科,邓扬悟,陈珊,葛体达,袁红朝,吴金水(1483)

桂林市仙喀斯特湿地水位梯度下不同植物群落土壤有机碳及其组分特征.....徐广平,李艳琼,沈育伊,张德楠,孙英杰,张中峰,周龙武,段春燕(1491)

缙云山4种森林植被土壤团聚体有机碳分布特征.....王富华,吕盛,黄容,高明,王子芳,徐畅(1504)

大气污染对居民健康影响研究进展.....秦耀辰,谢志祥,李阳(1512)

《环境科学》征订启事(1042) 《环境科学》征稿简则(1162) 信息(1208, 1235, 1286)

城市不同材料屋面径流的污染负荷特性

何湖滨, 陈诚*, 林育青*, 严哈璐, 董建玮, 陈求稳

(南京水利科学研究院生态环境研究中心, 南京 210024)

摘要: 分析不同材料屋面径流污染负荷特性, 对于提高城市面源污染负荷估算精度和确定初期径流截流比具有重要意义. 以扬州市为研究区域, 通过对小青瓦屋面、水泥瓦屋面和混凝土屋面这3种屋面进行降雨径流监测, 比较不同材料屋面径流污染物浓度、冲刷规律以及初期冲刷效应. 结果表明暴雨事件中, 小青瓦屋面径流中总氮(TN)、总磷(TP)、高锰酸盐指数和总悬浮物(TSS)的事件平均浓度(event mean concentration, EMC)约为水泥瓦屋面的4~9倍; 小青瓦屋面径流污染物浓度变化受雨强影响程度大于水泥瓦屋面, 其中TP和TSS的浓度变化趋势和雨强变化趋势的Pearson相关系数 r 分别为0.853和0.822; 各材料屋面的初期冲刷强度呈水泥瓦屋面>混凝土屋面>小青瓦屋面, 分别截流3种屋面初期径流的31.5%、58.0%和60.4%, 可以完成削减60.0%的屋面径流污染负荷量的目标. 如果未具体区分瓦屋面材料, 用水泥瓦屋面径流污染物的EMC估算古建筑聚集区的屋面污染负荷量, 将严重低估暴雨事件中TN、TP、TSS和高锰酸盐指数的实际排放量, 表明精细化区分屋面材料对提高城市面源负荷估算精度具有重要意义.

关键词: 城市面源污染; 冲刷规律; 初期径流截流; 径流污染负荷; 屋面材料

中图分类号: X522 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2019)03-1287-08 DOI: 10.13227/j.hjxx.201808155

Pollution Load Characteristics of Runoff from Urban Roofs of Different Materials

HE Hu-bin, CHEN Cheng*, LIN Yu-qing*, YAN Han-lu, DONG Jian-wei, CHEN Qiu-wen

(Center for Eco-Environmental Research, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210024, China)

Abstract: It is of great significance to analyze the runoff pollution load characteristics of different roof materials to improve the estimation accuracy of urban non-point source pollution loads. Yangzhou City was selected as the study area. There, three types of roofs were chosen for rainfall-runoff monitoring, including a Chinese style tile roof, cement tile roof, and concrete flat roof. The pollutant concentrations, scour law, and first flush effect of the three types of roofs were compared. The results show that the event mean concentration (EMC) of total nitrogen (TN), total phosphorus (TP), permanganate index, and total suspended solids (TSS) in the runoff of Chinese style tile roofs are around 4-9 times that in the runoff of cement tile roofs. The rainfall intensity exhibits stronger effect on the change in pollutant concentrations of runoff from the Chinese style tile roof than that from the cement tile roof. The Pearson correlation coefficients (r) of rainfall intensity against TP and TSS in time series were 0.853 and 0.822, respectively. The first flush intensities of the three types of roof materials were in the order cement tile roof > concrete flat roof > Chinese style tile roof. It was found that 60.0% of the roof runoff pollution load could be reduced by intercepting 31.5%, 58.0%, and 60.4% of the initial runoff for the Chinese style tile roof, the cement tile roof, and the concrete flat roof, respectively. The actual emissions of TN, TP, and TSS, and the permanganate index in rainstorm events would be significantly underestimated when roof materials are not distinguished. This would have negative effects on the pollution control of urban non-point sources. It is demonstrated that the fine distinction of roof materials is able to improve the estimation accuracy of urban non-point source loads.

Key words: urban non-point source pollution; scour law; initial runoff interception; runoff pollution load; roof materials

随着我国城市化进程的加快, 城市不透水面比例持续增加, 在降低地表下渗率的同时增加了地表径流量^[1,2]. 径流在汇流过程中冲刷、裹挟了来自屋面、道路等不同下垫面上累积的大量污染物^[3], 通过管网进入城市水体, 进而形成面源污染, 破坏城市水生态环境^[4,5].

城市面源污染已经成为城市水体污染的主要原因之一^[6]. 其中, 城市屋面作为承接大气干湿沉降的载体, 成为城市面源污染的重要来源^[7]. 我国对于屋面径流水质的研究起步较晚, 近年来, 在北京^[8]、重庆^[9]和南京^[10,11]等地, 针对城市面源污染的控制问题, 分别进行了关于屋面径流的试验研

究, 研究内容包括屋面径流的初期冲刷效应, 不同屋面材料对屋面径流水质的影响等.

目前大多数关于屋面材料对屋面径流水质的影响研究没有区分瓦屋面的具体类型, 均认为瓦屋面径流污染物浓度随降雨量变化呈指数型变化规律, 即初期径流污染物浓度较高, 随着降雨持续进行, 污染物浓度减小并趋于稳定^[12,13]. 而实际上不同材

收稿日期: 2018-08-19; 修订日期: 2018-09-19

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFC0401500); 国家自然科学基金青年科学基金项目(51709179); 江苏省水利科技项目(2017001ZB)

作者简介: 何湖滨(1994~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为城市水环境, E-mail: hehubin326@163.com

* 通信作者, E-mail: chencheng@nhri.cn; yqlin@nhri.cn

料瓦屋面的径流污染物冲刷规律、径流水质特征和初期冲刷效应均存在很大差别。在屋面径流污染特性研究中,进行不同类型的屋面材料的区分,能够提高面源污染负荷估算精度。

本文以扬州市作为研究区域,分析不同材料屋面对径流水质的影响,揭示屋面材料对屋面初期冲刷的影响规律,确定不同材料屋面初期径流截流百分比,以期为城市面源污染精细化防控和水环境治理效率提升提供支撑。

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

扬州市地处江苏省中部,位于长江北岸、江淮平原南端。近年来,城市水环境污染成为其水生态文明发展的瓶颈,而降雨径流引起的城市面源污染是导致其城市水环境恶化的主要因素^[14]。本文选择扬州人口密集,水环境问题较为突出的“一河两

片”地区中的北片作为研究区域。研究区域总面积 82.48 km²,其中屋面面积约为 31.45 km²,占总面积的 38.1%。1980~2016 年期间,扬州市年平均降雨量为 1 142.5 mm,总降雨天数 5 437 d,其中小雨(24 h 降雨量小于 10 mm)天数占比高达 77.2%,24 h 降雨量小于 5 mm 的天数占小雨天数的 83.8% 以上。

1.2 监测点布设

根据扬州市区域服务功能和土地利用现状,在研究区域选取距离相对较近的 3 种屋面(图 1)进行降雨径流监测,以减少大气沉降和降雨空间差异的影响。其中监测点 1 位于扬州市市级机关住宅区附近,屋面材料为小青瓦;监测点 2 位于扬州大学荷花池校区,屋面材料为混凝土;监测点 3 位于邗江区景祥苑小区,屋面材料为水泥瓦。小青瓦屋面和水泥瓦屋面为坡顶屋面,而混凝土屋面为平顶屋面。

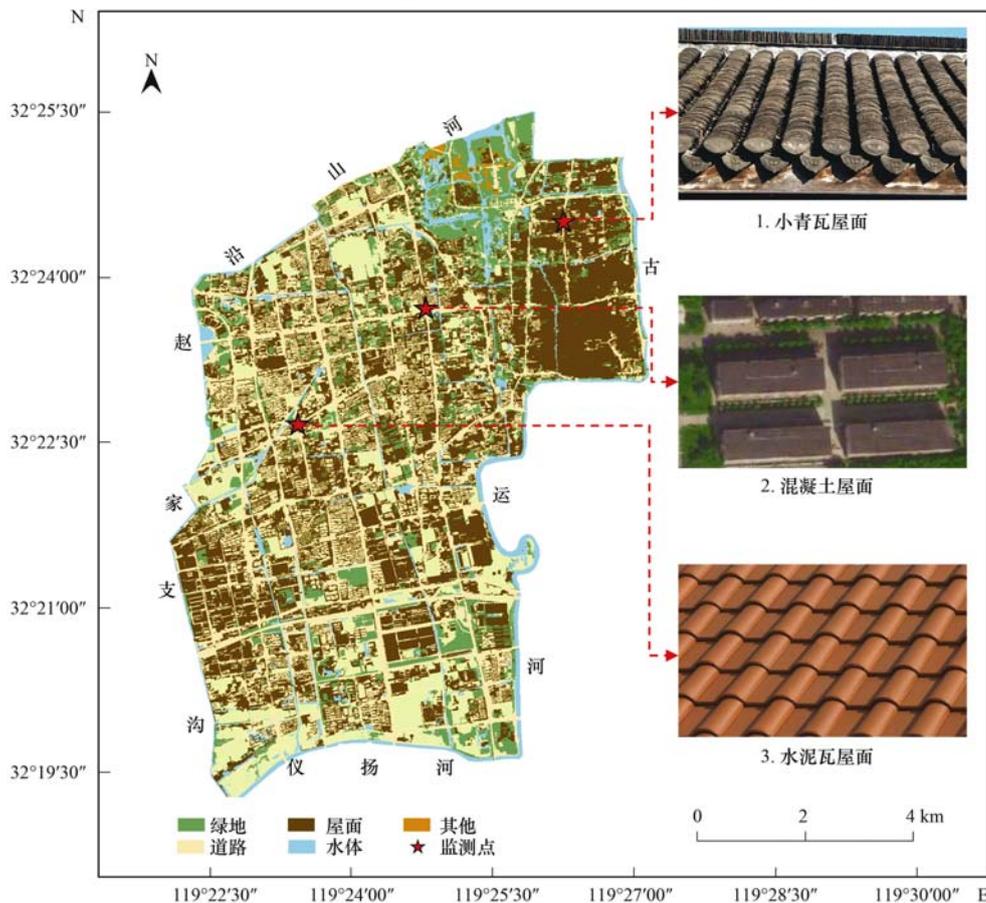


图 1 研究区域及监测点位屋面材料示意

Fig. 1 Schematic diagram of the research area and roof materials at the monitoring points

1.3 降雨径流监测

研究区域中小雨事件出现概率较高,暴雨事件是城市面源污染的主要驱动因素,因此选择小雨事件和暴雨事件进行径流监测,所反映的污染物冲刷规律以及污染负荷特性具有代表意义。因此于 2017

年 3 月 12 日和 8 月 7 日分别对 3 种屋面进行降雨径流人工监测,降雨数据由扬州市水文局提供,其中 3 月 12 日 24 h 降雨量为 4.0 mm(08:00~次日 08:00),8 月 7 日 24 h 降雨量为 63.5 mm(08:00~次日 08:00),分别满足《降水量等级》(GB/T

28592-2012) 中规定的小雨和暴雨标准^[15] (表 1)。

在小青瓦和水泥瓦屋面屋檐下方和混凝土屋面雨落管出水口处用 500 mL 聚乙烯瓶收集径流雨水, 降雨前期, 污染物浓度较高且变化较快, 监测频率为 1~3 min 一次; 降雨中期, 径流污染物浓度下降, 监测频率调整为 3~5 min 一次; 降雨后期, 污染物浓度趋于稳定, 监测频率为 10~15 min 一次^[16], 监测过程中记录每次样品采集的起止时间以及采样耗时, 采样过程遵守《水质采样技术指导》

(HJ 494-2009)^[17]。两次监测中每个监测点收集的水样数量如表 1 所示, 由于混凝土屋面为平坡屋面, 小雨事件中, 汇流时间较长, 收集到的水样数量相对较少, 难以反映屋面径流污染物浓度变化规律, 因此仅选择小青瓦和水泥瓦屋面收集的水样进行小雨径流水质指标分析。具体水质指标包括总氮 (TN)、总磷 (TP)、高锰酸盐指数、总悬浮物 (TSS)、氨氮 (NH₄⁺-N) 和硝态氮 (NO₃⁻-N), 检测方法参照文献^[18]。

表 1 降雨事件相关特征

Table 1 Characteristics of rainfall events

监测日期 (年-月-日)	24 h 降雨量 /mm	干期长度 /d	前次降雨事件 雨型(降雨量)/mm	屋面材料 (水样数量/个)
2017-03-12	4.0	19	小雨(6.9)	小青瓦(8)、水泥瓦(14)
2017-08-07	63.5	28	小雨(8.1)	小青瓦(20)、水泥瓦(22)、混凝土(15)

1.4 事件平均浓度计算

一场降雨引起的地表径流过程中, 雨强随机变化, 径流中污染物浓度随时间变化范围较大, 因此通常采用径流事件平均浓度 (event mean concentration, EMC) 来表征污染物的浓度, 采用下式可近似计算 EMC 值:

$$EMC = \frac{M}{V} = \frac{\int_0^{t_r} cQ_t dt}{\int_0^{t_r} Q_t dt} = \frac{\sum cQ_t \Delta t}{\sum Q_t \Delta t} \quad (1)$$

式中, M 表示整个径流过程中污染物的量, g; V 表示径流总量, m³; t 表示时间, min; t_r 表示 1 次径流的时持续时间, min; c 表示 t 时刻污染物浓度, mg·L⁻¹; Q_t 为 t 时刻径流流量, m³·s⁻¹; Δt 为监测

间隔时间, s。

2 结果与分析

2.1 不同材料屋面径流污染物浓度变化规律

不同材料屋面暴雨事件中径流污染物浓度变化趋势如图 2 所示, 其中水泥瓦和混凝土屋面径流中 TN、TP、高锰酸盐指数、TSS、NH₄⁺-N 和 NO₃⁻-N 浓度随时间均呈指数型下降趋势^[19], 而小青瓦屋面径流污染物浓度随时间变化波动较大, 尤其是 TP、高锰酸盐指数和 TSS 这 3 种污染物的浓度在变化过程中存在多处明显峰值。

2.2 不同雨强下屋面径流污染物浓度变化特征

前期研究中发现混凝土屋面径流污染物浓度变

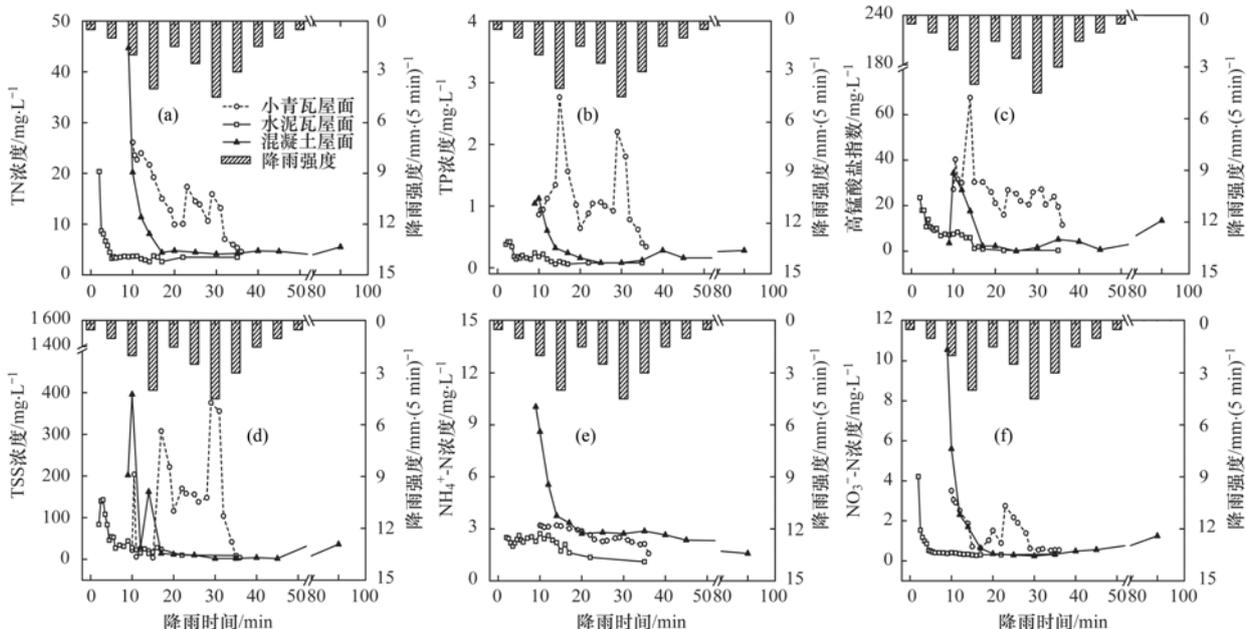


图 2 不同材料屋面径流污染物浓度变化趋势

Fig. 2 Variation trends of pollutant concentrations in runoff from roofs of different materials

化趋势在不同雨强下呈现出一致性^[16], 因此本文通过分析不同雨强下水泥瓦和小青瓦的径流污染物浓度变化趋势, 探明不同材料瓦屋面径流污染物浓度变化受雨强的影响. 图 3 和图 4 分别为不同雨强下水泥瓦和小青瓦屋面径流中 TP、TSS 浓度和高锰酸盐指数变化趋势对比图. 图 3 中水泥瓦屋面径流污染物浓度变化呈指数型下降趋势, 且 TP、TSS 浓度和高锰酸盐指数在不同雨强条件下变化趋势相似, 无显著差异 ($P > 0.05$), 说明水泥瓦屋面径流

污染物浓度变化规律受雨强影响较小. 由图 4 可以看出, 小雨事件中小青瓦屋面径流污染物浓度变化呈一般性的指数型下降趋势, 而暴雨事件中, 其变化趋势与雨强变化趋势类似, 其中 TP 和 TSS 浓度变化趋势与雨强变化趋势的 Pearson 相关性系数 r 分别为 0.853 和 0.822. 小青瓦屋面径流中 TP、TSS 浓度和高锰酸盐指数在小雨和暴雨期间存在显著差异 ($P < 0.05$), 表明小青瓦屋面径流污染物浓度变化规律受雨强影响较大.

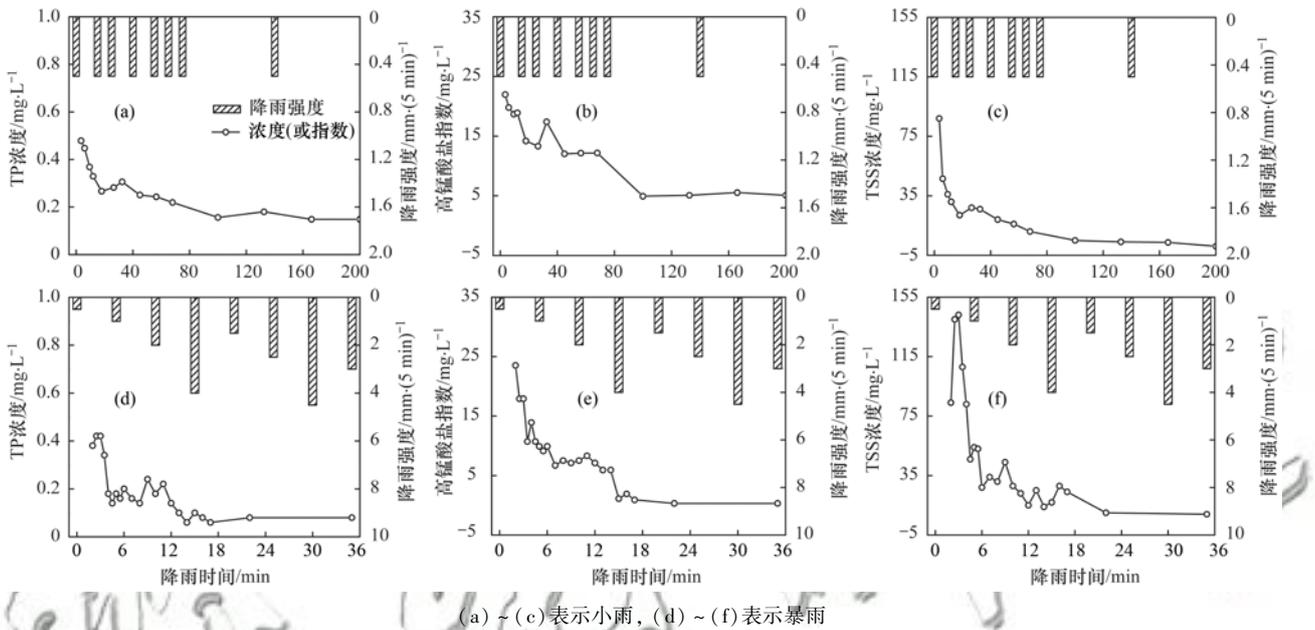


图 3 不同雨强下水泥瓦屋面 TP、TSS 浓度及高锰酸盐指数变化曲线

Fig. 3 Concentration curves of TP, TSS, and permanganate index of cement tile roof under different rainfall intensities

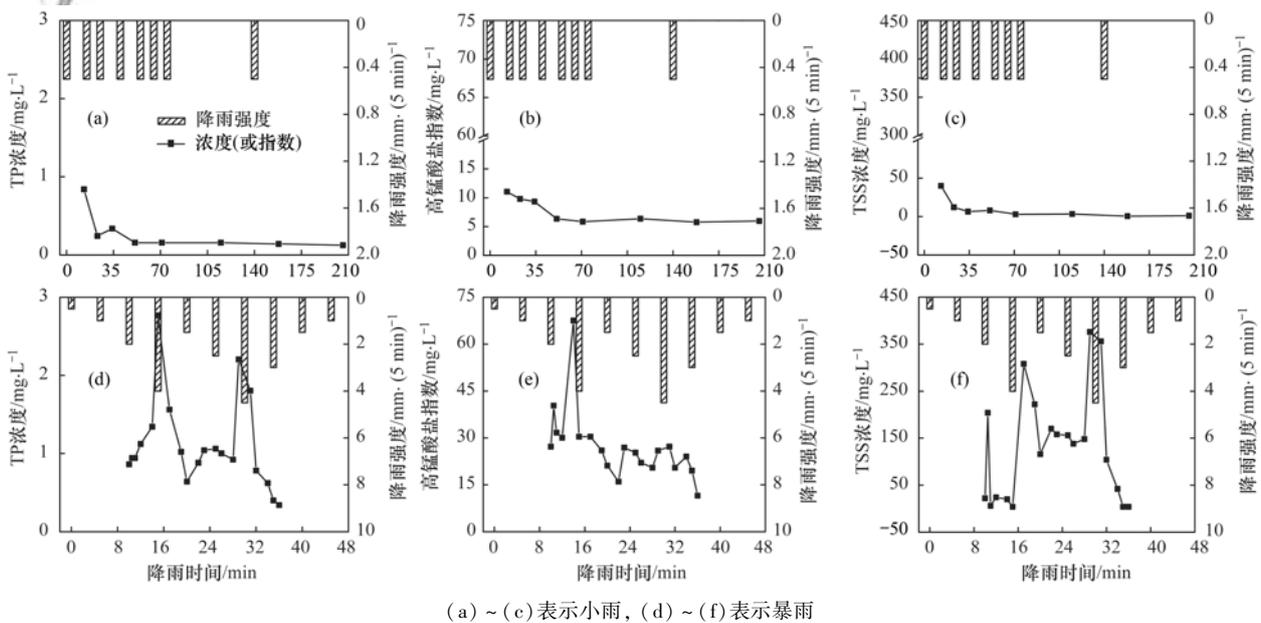


图 4 不同雨强下小青瓦屋面 TP、TSS 浓度及高锰酸盐指数变化曲线

Fig. 4 Concentration curves of TP, TSS, and permanganate index of Chinese style tile roof under different rainfall intensities

2.3 不同材料屋面径流污染物 EMC

表 2 为屋面径流中 6 种污染物 EMC 值的计算

结果. 暴雨期间, 小青瓦屋面径流各污染物中, 除了 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ ($2.72 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) 略低于混凝土屋面之外,

TN、TP 等其他 5 种污染物的 EMC 均为最高，其中 TN、TP、TSS 和高锰酸盐指数的 EMC 约为水泥瓦屋面的 4~9 倍。水泥瓦屋面径流中 6 种污染物的 EMC 在 3 种屋面中均为最低。总体而言，暴雨期间

3 种屋面的径流污染物 EMC 呈小青瓦屋面 > 混凝土屋面 > 水泥瓦屋面。小雨期间，水泥瓦屋面和小青瓦屋面径流中的 TN、TP、高锰酸盐指数、 NH_4^+ -N 和 NO_3^- -N 的 EMC 相差均较小。

表 2 屋面降雨径流 EMC 值统计/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$

Table 2 EMC value statistics table on roof rainfall-runoff/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$

降雨事件	屋面材料	TN	TP	高锰酸盐指数	TSS	NH_4^+ -N	NO_3^- -N
暴雨	小青瓦	16.07	1.12	27.30	117.04	2.72	1.68
	水泥瓦	3.66	0.12	4.48	29.69	1.85	0.42
	混凝土	6.73	0.27	18.52	45.69	3.29	1.16
小雨	小青瓦	7.82	0.18	7.03	6.71	1.03	4.73
	水泥瓦	7.78	0.22	9.60	13.01	0.77	4.45

小青瓦屋面(监测点 1)所在区域为扬州市古建筑聚集区,该区域面积约为 7.74 km^2 ,其中屋面面积约为 5.24 km^2 ,约占该区域面积的 67.8%。表 3 为是否考虑不同屋面材料的影响下计算的古建筑聚集区屋面径流污染负荷量统计结果。结果表明,如果不对两种瓦屋面(小青瓦和水泥瓦)进行区分,仅利用水泥瓦屋面的 EMC 估算整个古建筑聚集区的

屋面径流污染负荷量,那么本研究的暴雨事件中估算的 TN、TP、高锰酸盐指数和 TSS 负荷分别降低 0.84、0.08、1.62 和 5.74 t,很大程度地低估了实际屋面径流的污染负荷量。

2.4 不同材料屋面初期冲刷效应

不同材料屋面径流污染物随时间的累积情况如图 5 所示,可以看出屋面各污染物负荷的时间累积

表 3 古建筑聚集区径流污染负荷量统计/t

Table 3 Statistical table of runoff pollution loads in the congregate area of ancient buildings/t

项目	古建筑聚集区屋面径流污染负荷量					
	TN	TP	高锰酸盐指数	TSS	NH_4^+ -N	NO_3^- -N
采用屋面分类 EMC	1.26	0.09	2.14	9.17	0.21	0.13
未采用屋面分类 EMC	0.42	0.01	0.52	3.43	0.21	0.05

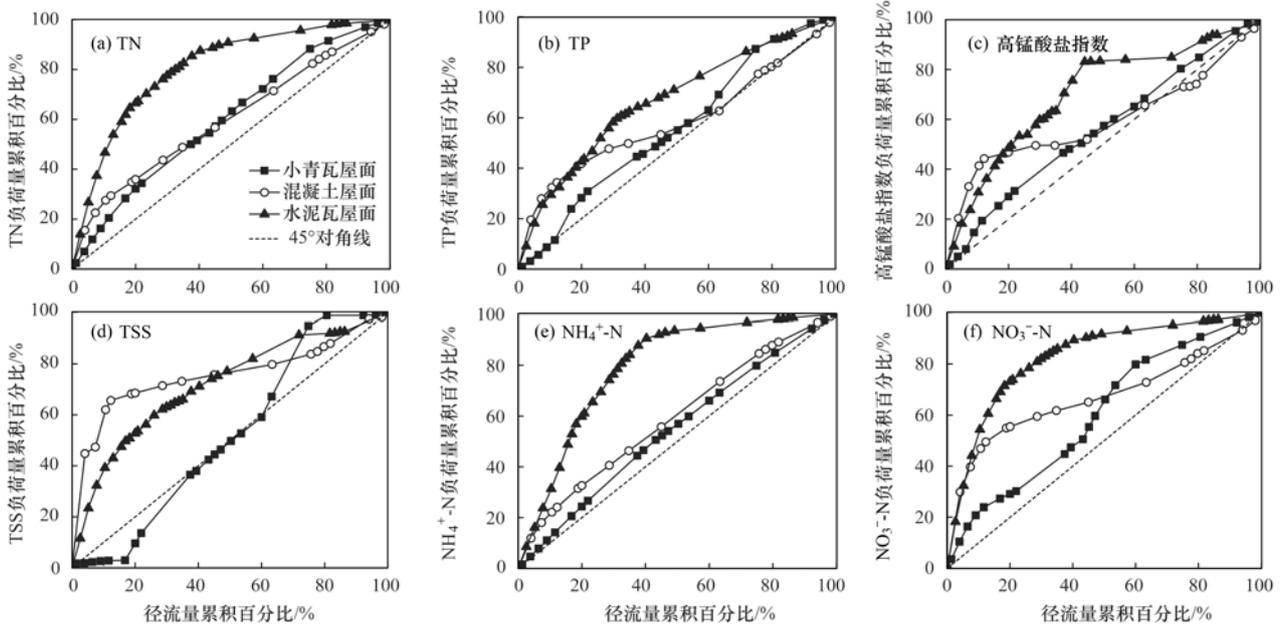


图 5 不同材料屋面降雨径流污染负荷累积分布曲线

Fig. 5 Cumulative distribution curves of rainfall runoff pollution load on roofs of different materials

规律类似,除了小青瓦屋面径流中的 TSS 之外,其余屋面污染物初期斜率均大于 1,累积分布曲线均在 45° 对角线上方。Deletic^[20] 提出初期 20.0% 降雨径流携带至少 40.0% 的污染负荷才出现明显的初

期冲刷。暴雨期间 3 种屋面初期冲刷程度如图 6 所示,小青瓦屋面径流污染物均未发生初期冲刷,其中只有 9.6% 的 TSS 和 24.4% 的 NH_4^+ -N 被前 20.0% 径流冲刷。相比之下,水泥瓦屋面径流中各

污染物均发生了初期冲刷,有 66.5% 的 TN、59.8% 的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 73.1% 的 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 可以被前 20.0% 径流携带进入排水管网. 另外,混凝土屋面径流中 TP、高锰酸盐指数、TSS 和 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 分别发生了不同程度的初期冲刷.

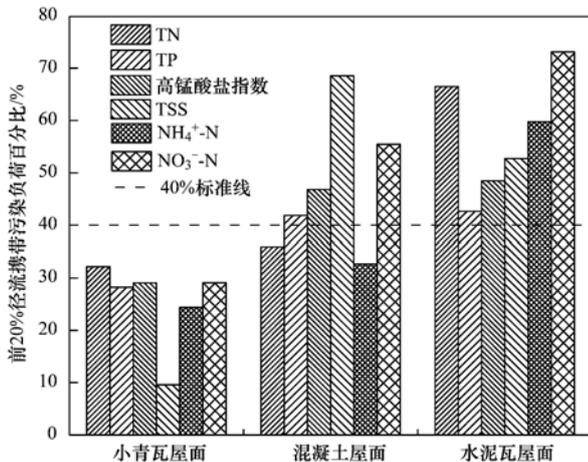


图6 不同材料屋面前 20% 径流携带污染负荷量累积百分比柱形图

Fig. 6 Cumulative percentage column chart of pollution load in the first 20% of runoff from roofs of different materials

3 讨论

3.1 不同材料屋面降雨径流冲刷规律

水泥瓦屋面和混凝土屋面径流污染物浓度在降雨期间均呈指数型下降, 主要因为屋面污染物随着降雨过程的进行不断减少^[21]. TP 在屋面径流中多以颗粒态形式存在, 且其浓度变化规律常与 TSS 类似^[22,23]. 小青瓦屋面径流中 TP 和 TSS 浓度在小雨期间呈指数型下降, 而在暴雨期间的浓度变化受雨强影响较大, 雨强较大时污染物浓度出现峰值(如图 4). 主要原因是雨强较小时, 小青瓦仅表面污染物被冲刷, 随着雨强增大, 小青瓦表面孔隙中的污染物逐渐被带动从孔隙中分离并进入径流中. 城市面源污染监测频次主要依据城市下垫面的冲刷曲线确定^[24], 对于水泥瓦屋面和混凝土屋面, 降雨初期监测频次较密, 随着降雨过程持续进行, 逐渐降低监测频次, 可以较完整地绘制屋面径流污染物浓度变化曲线, 合理地反映降雨事件平均浓度. 而对于小青瓦屋面, 由于其表面径流中 TP 和 TSS 浓度变化规律受雨强影响较大, 在监测过程中应根据雨强及时调整监测频次. 如果雨强峰值集中在降雨后期, 采用常规的监测方案, 将使得绘制的污染物浓度曲线错过峰值, 不能真实地反映径流污染物浓度变化规律, 从而影响 EMC 的取值精度, 导致初期冲刷效应分析和污染负荷量估算产生较大偏差.

3.2 屋面材料对径流水质的影响

通过收集国内近几年包括重庆^[9,25,26]、武汉^[27]和南京^[10,11]在内的各个城市屋面径流水质研究数据, 得到混凝土屋面径流污染物 EMC 平均值分别为 TN ($5.85 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$)、TP ($0.14 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$)、TSS ($52.62 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$) 和 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ ($1.47 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$), 瓦屋面径流污染物 EMC 平均值为 TN ($4.09 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$)、TP ($0.15 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$)、TSS ($47.62 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$) 和 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ ($1.22 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$). 本研究中, 混凝土屋面径流中 TN、TP 和 TSS 的 EMC (表 2) 均与各城市平均值接近, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ ($3.29 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$) 略高于各城市平均值, 张静等^[28]指出厕所排气口排放的氨气是城市大气氨氮污染的一个主要来源, 由于混凝土屋面所在区域为学校住宅区, 氨气有可能通过厕所排气口进入大气中, 并随着降雨进入径流. 水泥瓦屋面径流污染物 EMC 与各城市平均值接近, 受雨强影响较小. 小雨期间小青瓦屋面径流中 TSS 的 EMC 为 $6.71 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 低于各城市平均值, TN、TP 和 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的 EMC 与平均值接近, 而暴雨期间 4 种污染物 EMC 分别为 TN ($16.07 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$)、TP ($1.12 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$)、TSS ($117.04 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$) 和 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ ($2.72 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$), 均高于各城市平均值, 约为平均值的 2~7 倍. 水泥瓦屋面和小青瓦屋面所在区域的人口密度、交通强度和监测点屋面高度等条件接近, 两者的主要差异是瓦屋面材料不同, Chang 等指出径流水质受屋面材料影响较大^[29]. 水泥瓦主要由硅酸盐水泥和黄沙制成, 其表面涂有丙烯酸作为密封性保护膜, 既防止泛碱, 又封闭瓦体表面孔隙, 污染物在其表面不易滞留^[30]. 小青瓦的主要原料是粘土, 烧制过程中未达到瓷化温度, 表面粗糙, 留有未完全烧结的细小孔隙, 污染物在干期容易累积在其中, 尤其是 TP 和 TSS 等^[31]. 雨强较小时, 仅小青瓦瓦体表面污染物被径流冲刷, 孔隙中的污染物逐渐积累, 在雨强足够大时被冲刷进入地表径流. 因此, 暴雨事件中小青瓦屋面径流污染物 EMC 远高于小雨事件, 本研究中约为小雨事件中的 4~17 倍. 小青瓦屋面径流污染物 EMC 及浓度变化趋势受雨强变化影响程度远大于水泥瓦屋面, 说明屋面材料是影响屋面径流水质的一个重要因素.

3.3 不同材料屋面径流初期冲刷与污染负荷控制

相对于开放的汇水面来说, 屋面是一个面积固定的区域, 其污染物主要来自于大气沉降, 污染物在晴天积累, 降雨时雨水径流很容易冲刷大部分污染物, 因此更容易产生初期冲刷现象^[23]. 水泥瓦屋面径流中 6 种污染物均发生了不同程度的初期冲刷(图 6), 混凝土屋面径流中 TP、TSS 和高锰酸盐指

数也均发生了初期冲刷, 而小青瓦屋面所有污染物均未发生初期冲刷, 主要由于水泥瓦屋面比较光滑, 径流流动较快, 对其表面污染物冲刷彻底; 混凝土屋面较少受到人为踩压, 使得其表面 TP 和 TSS 等污染物可以被有效冲刷^[32]; 而小青瓦屋面吸水率较高, 且其铺设时, 一仰一覆, 使得降雨初期其表面径流深较小, 流动较慢, 干期积累在其表面孔隙中的污染物得不到有效冲刷, 尤其是 TSS、TP 等, 导致其表面径流污染物初期冲刷程度较弱. 总体而言, 各屋面初期冲刷程度强弱排序依次为水泥瓦屋面 > 混凝土屋面 > 小青瓦屋面.

一般情况下, 在降雨形成径流初期, 污染物浓度最高, 何流等^[33]认为初期径流中污染物浓度在数量级上与未经处理的城市污水基本相同. 相对于其余下垫面径流, 屋面径流具有水质较好、径流量较大和便于收集等特点, 因此截流屋面初期径流可以有效控制雨水污染, 且当径流污染物浓度趋于稳定后收集径流作中水回用, 可以缓解城市水资源紧张局势. 对小青瓦屋面、水泥瓦屋面和混凝土屋面分别截流初期径流的 60.4%、31.5% 和 58.0% 可以完成削减 60.0% 屋面径流污染负荷量的目标, 其中水泥瓦屋面初期雨水截流量是小青瓦屋面的 1/2 左右, 截流初期雨水削减污染负荷量的投资最小且效果最好.

国内很多学者在进行城市屋面降雨径流污染特性分析时, 很少明确区分具体瓦屋面材料, 使得城市面源污染研究结果存在一定偏差. 陆怡诚等^[34]在研究不同材料屋面对径流水质影响等过程中认为瓦材料本身无有机物释出, 属于环保材料, 对径流水质的有机污染程度较小. 小青瓦屋面材料本身虽然无有机物释出, 但是干期积累在其表面孔隙中的污染物在雨强增大时会逐渐析出. 从表 3 可以看出, 如果不对瓦屋面材料进行具体区分, 仅用水泥瓦屋面径流的污染物 EMC 估算整个古建筑聚集区的屋面污染负荷量, 结果将出现很大差异, 表明精细化区分屋面材料对提高城市面源负荷估算精度具有重要意义. 本研究对不同雨强的两次降雨事件进行了降雨径流监测, 结果可以反映不同雨强下, 小青瓦屋面径流污染物浓度变化趋势的差异, 通过对比说明小青瓦屋面径流污染物浓度变化受雨强影响程度大于水泥瓦屋面, 但是难以定量描述雨强对小青瓦屋面径流污染物浓度变化的影响. 后续研究将对小青瓦屋面进行更多场次的降雨径流监测, 以获取更加准确的径流污染物 EMC 值和冲刷规律, 为城市面源污染负荷量估算提供更准确的理论支撑.

4 结论

(1) 水泥瓦屋面和混凝土屋面径流污染物浓度随时间均呈指数型下降, 而小青瓦屋面径流污染物浓度变化规律受雨强影响较大, TSS、TP 等污染物浓度变化趋势与雨强变化趋势类似; 屋面材料是影响屋面径流水质随时间变化的重要因素.

(2) 各种屋面初期冲刷强度呈现水泥瓦屋面 > 混凝土屋面 > 小青瓦屋面; 对小青瓦屋面、水泥瓦屋面、混凝土屋面分别截流 60.4%、31.5% 和 58.0% 的初期径流可以削减 60.0% 的总径流污染负荷量, 其中水泥瓦屋面截流初期径流削减污染负荷的投资最小.

(3) 瓦质屋面径流污染物 EMC 受雨强影响程度存在较大差异, 水泥瓦屋面径流 EMC 受雨强影响较小, 小青瓦屋面径流 EMC 受雨强影响显著, 暴雨事件 EMC 约为小雨事件的 4~17 倍; 精细区分屋面材料对提高城市面源负荷估算精度具有重要意义, 若不具体区分瓦屋面材料, 用水泥瓦屋面径流的污染物 EMC 估算整个古建筑聚集区的屋面污染负荷量, 将严重低估暴雨事件中 TN、TP、TSS 和高锰酸盐指数的实际排放量.

参考文献:

- [1] Brezonik P L, Stadelmann T H. Analysis and predictive models of stormwater runoff volumes, loads, and pollutant concentrations from watersheds in the Twin Cities metropolitan area, Minnesota, USA[J]. *Water Research*, 2002, **36**(7): 1743-1757.
- [2] Walsh C J, Fletcher T D, Burns M J. Urban stormwater runoff: a new class of environmental flow problem[J]. *PLoS One*, 2012, **7**(9): e45814.
- [3] 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 Environment Sciences*, 2014, **23**(2): 352-358.
- [4] 贺缠生, 傅伯杰, 陈利顶. 非点源污染的管理及控制[J]. *环境科学*, 1998, **19**(5): 87-91.
He C S, Fu B J, Chen L D. Non-point source pollution control and management[J]. *Environmental Science*, 1998, **19**(5): 87-91.
- [5] Perdrikaki K, Mason C F. Impact of road run-off on receiving streams in eastern England[J]. *Water Research*, 1999, **33**(7): 1627-1633.
- [6] León L F, Soulis E D, Kouwen N, *et al.* Nonpoint source pollution: a distributed water quality modeling approach [J]. *Water Research*, 2001, **35**(4): 997-1007.
- [7] 王和意. 上海城市降雨径流污染过程及管理措施研究[D]. 上海: 华东师范大学, 2005.
- [8] 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.
- [9] 郝丽岭. 重庆城市居民区不同下垫面降雨径流污染及其控制研究[D]. 重庆: 西南大学, 2012.
- [10] 张科峰. 南京市屋面雨水径流水质特性研究[D]. 南京: 东南大学, 2011.
- [11] 刘守城, 何兆芳, 张烨, 等. 屋面雨水径流水质特性研究[J]. 环境科技, 2012, **25**(6): 28-31.
Liu S C, He Z F, Zhang Y, *et al.* Characteristics of the roof runoff water quality[J]. Environmental Science and Technology, 2012, **25**(6): 28-31.
- [12] Larsen T, Broch K, Andersen M R. First flush effects in an urban catchment area in aalborg [J]. Water Science and Technology, 1998, **37**(1): 251-257.
- [13] Förster J. Variability of roof runoff quality [J]. Water Science and Technology, 1999, **39**(5): 137-144.
- [14] 丁纯, 何金发, 王少鹏, 等. 扬州市水环境现状和治理对策研究[M]. 北京: 社会科学文献出版社, 2012. 440-449.
- [15] GB/T 28592-2012, 降水量等级[S].
- [16] 何梦男, 张劲, 陈诚, 等. 上海市淀北片降雨径流过程污染时空特性分析 [J]. 环境科学学报, 2018, **38**(2): 536-545.
He M N, Zhang J, Chen C, *et al.* Analysis of the temporal and spatial characteristics of rainfall-runoff pollution in Dianbei basin of Shanghai[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2018, **38**(2): 536-545.
- [17] HJ 494-2009, 水质 采样技术指导[S].
- [18] 国家环境保护总局. 水和废水监测分析方法[M]. (第四版). 北京: 中国环境科学出版社, 2002.
- [19] Sartor J D, Boyd G B, Agardy F J. Water pollution aspects of street surface contaminants[J]. Journal (Water Pollution Control Federation), 1974, **46**(3): 458-467.
- [20] Deletic A. The first flush load of urban surface runoff[J]. Water Research, 1998, **32**(8): 2462-2470.
- [21] 尹澄清. 城市面源污染的控制原理和技术[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2009.
- [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[J]. 环境科学, 2008, **29**(11): 3035-3042.
Wang B, Li T, Meng Y Y, *et al.* Distribution form of nutrients in roof runoff [J]. Environmental Science, 2008, **29**(11): 3035-3042.
- [23] 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.
- [24] Yusop Z, Tan L W, Ujang Z, *et al.* Runoff quality and pollution loadings from a tropical urban catchment [J]. Water Science & Technology: A Journal of the International Association on Water Pollution Research, 2005, **52**(9): 125-132.
- [25] 王书敏. 山地城市面源污染时空分布特征研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2012.
- [26] 高勇. 山地城市居民区面源污染特征及其控制研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2011.
- [27] 李立青, 朱仁肖, 郭树刚, 等. 基于源区监测的城市地表径流污染空间分异性研究 [J]. 环境科学, 2010, **31**(12): 2896-2904.
Li L Q, Zhu R X, Guo S G, *et al.* Research on spatial differentiation of urban stormwater runoff quality by source area monitoring [J]. Environmental Science, 2010, **31**(12): 2896-2904.
- [28] 张静, 周玉文, 王中正, 等. 北方城市天然降水中氨氮污染特征研究[J]. 环境科学与技术, 2016, **39**(6): 129-134.
Zhang J, Zhou Y W, Wang Z Z, *et al.* Characteristics of ammonia nitrogen pollution in natural rainfall of Chinese Northern city [J]. Environmental Science & Technology, 2016, **39**(6): 129-134.
- [29] Chang M, McBroom M W, Beasley R S. Roofing as a source of nonpoint water pollution [J]. Journal of Environmental Management, 2004, **73**(4): 307-315.
- [30] 魏伟. 陶土瓦与通体彩色水泥瓦的对比[J]. 砖瓦, 2011, (4): 35-36.
- [31] 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[J]. 城市环境与城市生态, 2015, **28**(3): 35-38.
Wang S, Li M, Zhang L Q. Characteristics analysis of heavy metal pollution in runoff from different types of roof [J]. Urban Environment & Urban Ecology, 2015, **28**(3): 35-38.
- [32] 李春林, 刘森, 胡远满, 等. 沈阳市降雨径流初期冲刷效应 [J]. 生态学报, 2013, **33**(18): 5952-5961.
Li C L, Liu M, Hu Y M, *et al.* Analysis of first flush in rainfall runoff in Shenyang urban city [J]. Acta Ecologica Sinica, 2013, **33**(18): 5952-5961.
- [33] 何流, 陈文森, 张超. 城市雨水径流污染控制研究[J]. 能源与环境, 2011, (4): 95-96.
- [34] 陆怡诚, 纪桂霞, 吕天恒, 等. 城市屋面雨水初期径流污染特征与规律研究[J]. 水资源与水工程学报, 2011, **22**(4): 85-88.
Lu Y C, Ji G X, Lv T H, *et al.* Research on the pollution characteristics and rule of runoff from roofs of urban buildings in primary stage [J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2011, **22**(4): 85-88.

CONTENTS

Contribution Assessment of Meteorology Conditions and Emission Change for Air Quality Improvement in Beijing During 2014-2017	YIN Xiao-mei, LI Zi-ming, XIONG Ya-jun, <i>et al.</i>	(1011)
Using Multiple Linear Regression Method to Evaluate the Impact of Meteorological Conditions and Control Measures on Air Quality in Beijing During APEC 2014	LI Ying-ruo, WANG Jun-xia, HAN Ting-ling, <i>et al.</i>	(1024)
Source Apportionment of PM _{2.5} in Suburban Area of Beijing-Tianjin-Hebei Region in Autumn and Winter	WANG Tong, HUA Yang, XU Qing-cheng, <i>et al.</i>	(1035)
Fine Particulate Matter Source Profile of Typical Industries in Sichuan Province	FENG Xiao-qiong, CHEN Jun-hui, XIONG Wen-peng, <i>et al.</i>	(1043)
Source Apportionment and Pollution Characteristics of PM _{2.5} During the Two Heavy Pollution Episodes in the Winter of 2016 in a Typical Logistics City	ZHAO Xue-yan, YANG Wen, WANG Jing, <i>et al.</i>	(1052)
Pollution Characteristics and Source Apportionment of PM _{2.5} in Heating and Non-heating Periods in Shenyang	ZHANG Xian, TIAN Sha-sha, LIU Ying-ying, <i>et al.</i>	(1062)
Interannual Variation of Metal Elements and Water-Soluble Ions in PM _{2.5} During Wintertime in Xinxiang and Their Source Apportionment	YAN Guang-xuan, LEI Hao-jie, ZHANG Jing-wen, <i>et al.</i>	(1071)
Pollution Characteristics and Source Apportionment of Ambient PM _{2.5} During Four Seasons in Yantai City	LIU Tong, WANG Xiao-jun, CHEN Qian, <i>et al.</i>	(1082)
Day-night Characteristics of Humic-like Substances in PM _{2.5} During Winter in Changzhou	GU Yuan, LI Qing, HUANG Wen-qian, <i>et al.</i>	(1091)
Pollution Characteristics and Occupational Exposure Risk of Heavy Metals in Indoor and Outdoor Ambient Particles at a Scaled Electronic Waste Dismantling Plant, Northwest China	CAO Hong-mei, ZHAO Liu-yuan, MU Xi, <i>et al.</i>	(1101)
Analysis of a Pollution Process in the Beijing-Tianjin-Hebei Region Based on Satellite and Surface Observations	QIU Yun, LI Ling-jun, JIANG Lei, <i>et al.</i>	(1111)
Spatial-temporal Variation of Ozone Concentration and Its Driving Factors in China	HUANG Xiao-gang, ZHAO Jing-bo, CAO Jun-ji, <i>et al.</i>	(1120)
Ozone Spatial-temporal Distribution and Trend over China Since 2013: Insight from Satellite and Surface Observation	ZHANG Qian-qian, ZHANG Xing-ying	(1132)
Characteristics of Ozone Pollution Distribution and Source Apportionment in Zhoushan	WANG Qiao-li, DONG Min-li, LI Su-jing, <i>et al.</i>	(1143)
Establishment of VOCs Emissions Factor and Emissions Inventory from Using of Architectural Coatings in China	GAO Mei-ping, SHAO Xia, NIE Lei, <i>et al.</i>	(1152)
Heterogeneous Oxidation of Secondary Organic Tracers of Isoprene and Toluene by Ozone	HUANG Ya-juan, CAO Gang, ZHU Rong-shu, <i>et al.</i>	(1163)
Inventory and Spatiotemporal Distribution of Ammonia Emission from Agriculture and Animal Husbandry in Lanzhou City	LI Shi-xue, GUO Wen-kai, HE Xin, <i>et al.</i>	(1172)
Analysis of Stable Hydrogen and Oxygen Isotope Characteristics and Vapor Sources of Event-based Precipitation in Chengdu	HU Yue, LIU Guo-dong, MENG Yu-chuan, <i>et al.</i>	(1179)
Diffusive CO ₂ Flux Across the Water-air Interface of Reclaimed Shrimp Ponds in the Minjiang River Estuary Based on the TBL Model	ZHANG Yi-fei, YANG Ping, ZHAO Guang-hui, <i>et al.</i>	(1188)
Distribution and Seasonal Variations of Chromophoric Dissolved Organic Matter (CDOM) in the Bohai Sea and the North Yellow Sea	LIU Zhao-bing, LIANG Wen-jian, QIN Li-ping, <i>et al.</i>	(1198)
Sources, Characteristics and Transformation Dynamics of Fluorescent Dissolved Organic Matter in the Silin Reservoir	LAO Xin-yu, YUAN Jie, LIU Yu, <i>et al.</i>	(1209)
Microplastic Pollution of the Beaches in Xiamen Bay, China	LIU Qi-ming, LIANG Hai-tao, XI Gui-li, <i>et al.</i>	(1217)
Biogeochemical Characteristics in Shengli Site of Lijiang River Under the High Resolution Monitoring	WANG Qi-gang, XIAO Qiong, ZHAO Hai-juan, <i>et al.</i>	(1222)
Hydrochemical Characteristics and Possible Controls of Groundwater in the Xialatuo Basin Section of the Xianshui River	HE Jin, ZHANG You-kuan, ZHAO Yu-qing, <i>et al.</i>	(1236)
Pollution Characteristics of OPEs in the Surface Water and Sediment of the Jinjiang River in Chengdu City	WU Di, YIN Hong-ling, LI Shi-ping, <i>et al.</i>	(1245)
Community Structure and Predictive Functional Analysis of Surface Water Bacterioplankton in the Danjiangkou Reservoir	ZHANG Fei, TIAN Wei, SUN Feng, <i>et al.</i>	(1252)
Influence of Cyanobacterial Blooms on Denitrification Rate in Shallow Lake Taihu, China	LIU Zhi-ying, XU Hai, ZHAN Xu, <i>et al.</i>	(1261)
Assessment of Ecosystem Health of an Urban River Based on the Microbe Index of Biotic Integrity (M-IBI)	SU Yao, XU Yu-xin, AN Wen-hao, <i>et al.</i>	(1270)
Influences of Biochar Application on Root Aerenchyma and Radial Oxygen Loss of <i>Acorus calamus</i> in Relation to Subsurface Flow in a Constructed Wetland	HUANG Lei, LIANG Yin-kun, LIANG Yan, <i>et al.</i>	(1280)
Pollution Load Characteristics of Runoff from Urban Roofs of Different Materials	HE Hu-bin, CHEN Cheng, LIN Yu-qing, <i>et al.</i>	(1287)
Preparation of BiOCl-(NH ₄) ₃ PW ₁₂ O ₄₀ Photocatalyst and a Mechanism for Photocatalytic Degradation of Organic Pollutants	ZHANG Wen-hai, JI Qing-hua, LAN Hua-chun, <i>et al.</i>	(1295)
High Efficiency Removal of 1,2-Dichloroethane from Groundwater by Microscale Zero-valent Iron Combined with Biological Carbon Source	WU Nai-jin, SONG Yun, WEI Wen-xia, <i>et al.</i>	(1302)
Removal of Lead Ions from Water by Struvite Natural Zeolite Composite	DEND Man-jun, WANG Xue-jiang, CHENG Xue-jun, <i>et al.</i>	(1310)
Characteristics of Phosphorus Adsorption in Aqueous Solution By Ca/Mg-Loaded Biogas Residue Biochar	YI Man, LI Ting-ting, LI Hai-hong, <i>et al.</i>	(1318)
Preparation of Two Kinds of Biochar and the Factors Influencing Tetracycline Removal from Aqueous Solution	CHENG Yang, SHEN Qi-bin, LIU Zi-dan, <i>et al.</i>	(1328)
Effect of Zirconium-Modified Zeolite Addition on Migration and Transformation of Phosphorus in River Sediments Under Static and Hydrodynamic Disturbance Conditions	YU Yang, LIN Jian-wei, ZHAN Yan-hui, <i>et al.</i>	(1337)
Removal Efficiencies and Mechanism Research on Four Sulfonamides and Their Acetyl Metabolites in a Wastewater Treatment Plant	WANG Da-peng, ZHANG Xian, YAN Chang-zhou	(1347)
Assessing Performance of Pollutant Removal from Municipal Wastewater by Physical and Chemical Methods Based on Membranes	XU Ting, LI Yong, ZHU Yi-jia, <i>et al.</i>	(1353)
Effect of Influent Ammonia Concentration on a Biological Phosphorus Removal Granules System	LI Dong, CAO Mei-zhong, GUO Yue-zhou, <i>et al.</i>	(1360)
Start-up and Performance Recovery of Granular Sludge for Phosphorus Removal and Nitrification	LI Hai-ling, LI Dong, ZHANG Jie, <i>et al.</i>	(1367)
Realization of Short-cut Nitrification in a CAST Process at High Temperature and Its Phosphorus Removal Performance	MA Juan, YANG Rui-chun, YU Xiao-jun, <i>et al.</i>	(1375)
Nitrogen and Phosphorus Removal from Low C/N Municipal Wastewater Treated by a SPNDR System with Different Aeration and Aerobic Times	YUAN Meng-fei, YU De-shuang, GONG Xiu-zhen, <i>et al.</i>	(1382)
ABR Decarbonization-Nitrosation Coupled with ANAMMOX to Treat Municipal Wastewater	LI Tian, CAO Jia-wei, XIE Feng-lian, <i>et al.</i>	(1390)
Start-up Performance and Sludge Characteristics of Single-stage Autotrophic Nitrogen Removal System with Granular Sludge at Low Ammonia Nitrogen Concentration at Room Temperature	XIE Lu-lin, WANG Jian-fang, QIAN Fei-yue, <i>et al.</i>	(1396)
ANAMMOX Reactor with Two Kinds of Inoculated Sludge: Start-up and Kinetics Characteristics	REN Jun-yi, CHEN Lin-yi, LI Hui-chun, <i>et al.</i>	(1405)
Operation Characteristics of the Biofilm CANON Reactor During the Temperature Reduction Process	FU Kun-ming, LIAO Min-hui, ZHOU Hou-tian, <i>et al.</i>	(1412)
Nitrogen Removal Characteristics and Analysis of Microbial Community Structure in an IEM-UF Simultaneous Separation and Denitrification System	LIU Zi-qi, ZHANG Yan, MA Xiang-shan, <i>et al.</i>	(1419)
Effect of Temperature on the Activity Kinetics of <i>Nitrobacter</i>	YU Xue, SUN Hong-wei, LI Wei-wei, <i>et al.</i>	(1426)
Enhancement for Anaerobic Digestion of Waste Activated Sludge Based on Microwave Pretreatment Combined with Zero Valent Iron	NIU Yu-tong, LIU Ji-bao, MA Shuang, <i>et al.</i>	(1431)
Effects of Environmental Factors on Tetracyclines and Macrolides Resistance Genes in Cattle Manure Composting Systems	PENG Jing, WANG Ke, GU Yue, <i>et al.</i>	(1439)
Effect of Environmental Factors on Variation Characteristics of Soil Microbial Respiration and Its Temperature Sensitivity	ZHANG Yan-jun, GUO Sheng-li	(1446)
Response of Soil Respiration and Its Components to Simulated Acid Rain in a Typical Forest Stand in the Three Gorges Reservoir Area	LI Yi-fan, WANG Yu-jie, WANG Bin, <i>et al.</i>	(1457)
Effects of Fertilization on the Nitrogen Residual Amounts and Leaching from Citrus Orchard Soil in the Three Gorges Reservoir Area	WANG Tian, HUANG Zhi-lin, ZENG Li-xiong, <i>et al.</i>	(1468)
Microbial Carbon Source Metabolic Profile in Rice Rhizosphere and Non-rhizosphere Soils with Different Long-term Fertilization Management	NING Zhao, CHENG Ai-wu, TANG Hai-ming, <i>et al.</i>	(1475)
Characterization of Soil Organic Carbon Mineralization Under Different Gradient Carbon Loading in Paddy Soil	TONG Yao-yao, WANG Ji-fei, ZHU Zhen-ke, <i>et al.</i>	(1483)
Soil Organic Carbon Distribution and Components in Different Plant Communities Along a Water Table Gradient in the Huixian Karst Wetland in Guilin	XU Guang-ping, LI Yan-qiong, SHEN Yu-yi, <i>et al.</i>	(1491)
Distribution of Organic Carbon in Soil Aggregates from Four Kinds of Forest Vegetation on Jinyun Mountain	WANG Fu-hua, LÜ Sheng, HUANG Rong, <i>et al.</i>	(1504)
Review of Research on the Impacts of Atmospheric Pollution on the Health of Residents	QIN Yao-chen, XIE Zhi-xiang, LI Yang	(1512)