

DOI: 10.13671/j.hjkxxb.2021.0091

杨伟伟 孟颖 袁庆科,等.2021.岛屿硬化集水面雨水弃流方案与分质收集策略研究[J].环境科学学报 41(11):4585-4595

Yang W W , Meng Y , Yuan Q K , et al. 2021. Strategies of first-flush diversion and dual rainwater harvesting from impervious catchment in island area [J]. Acta Scientiae Circumstantiae 41(11):4585-4595

岛屿硬化集水面雨水弃流方案与分质收集策略研究

杨伟伟^{1,2} 孟颖² 袁庆科^{2,*} 姚国庆⁴ 郑雨^{2,5} 栾富波^{2,3} 徐大勇^{1,*}

1. 安徽工程大学化学与环境工程学院, 芜湖 241000

2. 中国科学院生态环境研究中心, 中国科学院饮用水科学与技术重点实验室, 北京 100085

3. 中国科学院大学, 北京 100049

4. 中国葛洲坝集团海外投资有限公司, 北京 100000

5. 山东建筑大学市政与环境工程学院, 济南 250101

摘要: 通过研究海南岛文昌市水泥屋顶和水泥路面上的雨水径流特征,建立了岛屿地区不同硬化集水面的雨水弃流方案和分质收集策略。在降雨初期,水泥路面和水泥屋顶均发生明显的冲刷效应,水泥路面雨水径流污染物浓度远高于水泥屋顶,且不同硬化集水面上前 30% 雨水中的污染物浓度均高于后 70% 的雨水。通过与相关水质指标对比得出,水泥屋顶雨水径流可作为饮用水水源,水泥路面雨水径流经处理可作为城市杂用水使用。通过建立雨水径流污染物累积-冲刷经验模型,可计算不同硬化集水面的弃流雨量,并以此为依据制定了弃流方案。以两种典型硬化集水面径流污染物传输特征、水质特征和弃流方案为基础,分别提出了屋顶雨水收集方案和多种生态方法协同作用的路面雨水收集方案,可为岛屿地区的雨水收集利用方案提供参考依据。

关键词: 岛屿地区; 硬化集水面; 雨水弃流; 分质收集

文章编号: 0253-2468(2021)11-4585-11

中图分类号: X524

文献标识码: A

Strategies of first-flush diversion and dual rainwater harvesting from impervious catchment in island area

YANG Weiwei^{1,2}, MENG Ying², YUAN Qingke^{2,*}, YAO Guoqing⁴, ZHENG Yu^{2,5}, LUAN Fubo^{2,3}, XU Dayong^{1,*}

1. College of Chemistry and Environmental Engineering, Anhui Polytechnic University, Wuhu 241000

2. Key Laboratory of Drinking Water Science and Technology, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085

3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049

4. China Gezhouba Group Overseas Investment Co., LTD., Beijing 100000

5. School of Municipal & Environmental and Engineering, Shandong Jianzhu University, Jinan 250101

Abstract: In this study, we investigated the characteristics of the rainwater runoff from cement roof and pavement in Wenchang city, Hainan Province to establish the strategies for diverting first-flush and collecting rainwater from different impervious catchment. It was found that first flush effect occurred in most rainfall events. The pollutant concentrations of rainwater runoff from cement pavement were much higher than those on cement roof, while the concentrations of pollutant in the initial 30% rainwater from different impervious catchments were higher than those in the latter 70%. By comparing with relevant water quality indexes, the rainwater runoff from cement roof could be used as drinking water, and rainwater from cement pavement could be harvested for urban miscellaneous water after treatment. According to the development of stormwater runoff pollutant build-up and wash-off model, volumes of diverted water on different impervious catchment could be calculated and the diversion strategy was then established. Correspondingly, the household and eco-friendly rainwater harvesting strategies were developed with respect to two impervious catchments based on the transport characteristics and quality of runoff pollutants, first-flush diversion and maximum amount of water that can be available harvested. Hereby, it provides a valid reference basis for rainwater harvesting in island.

收稿日期: 2021-01-28

修回日期: 2021-02-27

录用日期: 2021-02-27

基金项目: 国家重点研发计划课题(No.2019YFD1100103, 2020YFD1100500); 中国-斯里兰卡水技术研究与示范联合中心资助项目; 中国科学院中国-斯里兰卡联合科教中心

作者简介: 杨伟伟(1997—)男, E-mail: yangww0902@163.com; * 责任作者, E-mail: qkyuan@rcees.ac.cn

Keywords: islands; impervious paved-surface; rainwater diversion; dual rainwater collection

1 引言(Introduction)

海岛是国家领土的重要组成部分,不仅有着不可估量的经济价值、科学价值和生态价值,也是维护国家安全和地缘政治稳定的重要基石。随着岛屿现代化建设进程逐步加快,岛屿用水量不断增大。但岛屿地区淡水资源匮乏(Liu *et al.*, 2006),用水长期依靠外运或海水淡化、成本较高。雨水作为一种非常规水源,具有非耗竭性、可重复利用性、水量充沛等特点,受到越来越多的关注(Abdulla *et al.*, 2009; Sample *et al.*, 2014; Fonseca *et al.*, 2017)。其次,雨水作为自然界水循环系统的重要组成部分,其水质稳定,污染程度较轻,硬度较低,经适当处理后可作为饮用水、生活杂用水和灌溉用水等水源。同时,雨水资源化能减少岛屿对大陆远距离运送淡水的依赖性,提高岛屿独立生存和可持续发展能力。因此,收集利用雨水是解决岛屿地区淡水资源短缺问题的有效措施。

随着近年来我国岛屿开发进程的加快,岛屿地区硬化集水面面积不断增加,可收集雨水水量大幅提升。但硬化集水面改变了原有的水文循环过程及雨水径流中污染物的时空分布格局、迁移机制和环境效应等,导致其成为污染物的主要容纳体,而降雨径流则成为驱动污染物输移的关键载体。雨水径流对硬化集水面的冲刷作用形成的面源污染已经成为当前影响收集雨水水质、水量的首要问题。而在降雨初期形成的高污染物负荷径流是影响雨水收集的关键因素(刘志勇等, 2016)。因此,制定初期雨水弃流方案是雨水资源化利用的首要步骤。但关于应该弃流多少雨水,弃流量是应该基于体积、降雨量、降雨持续时间还是降雨强度,尚未达成一致的意见。目前,常规的弃流方案是根据地区降雨特点或是模拟实验而确定的固定经验值(Yaziz *et al.*, 1989; Cunliffe, 1998; Martinson *et al.*, 2005),由于降雨的随机性和污染物输移的不确定性,直接参照并制定弃流方案极易出现过度弃流或弃流不充分的现象。因此,亟需通过识别径流中污染物的传输规律来构建更为精确的弃流方案。但有量化初期冲刷效应的相关研究主要集中于计算城市街道的降雨初期污染物的迁移输出过程(赵磊, 2015; 秦语涵, 2016),忽略了对后期雨水径流水质的跟踪研究

(郑毅等, 2009; 王岚等, 2013)。1972年, Sartor等(1972)提出了径流污染物累积-冲刷模型,主要用于描述地表径流污染物排放过程,评估地表径流污染及其控制策略。作为一类定量化模型, Sartor&Boyd模型可通过估算降雨过程中实际产生的污染物负荷和传输能力,并根据相应水质标准计算出不同降雨条件下的理论弃流量,有效控制弃流后的雨水径流质量,保障可收集雨水水质水量安全。

岛屿的基础民生设施建设是维护我国国家安全和发展的重大战略需求,而雨水资源化利用则成为解决淡水资源短缺限制岛屿地区发展的可行之策。但由于我国对岛屿雨水利用与资源化的研究仍处于起步阶段,目前岛屿雨水收集工作受气候和环境的影响,稳定性不高,仅作为应急水源,导致丰富的雨水资源没有得到有效利用,大部分雨水渗流入海(姜海波, 2014)。其它各地区因降雨分布规律、径流污染物特征以及地理条件具有时空分异的特点,雨水收集利用的模式存在较大差异,其成功案例并不适宜岛屿地区推广利用。为确保能够收集利用清洁、优质、足量的雨水,需根据岛屿地区不同硬化集水面的雨水径流水质特征和分布情况对相应的收集策略进行深入细致的探讨,进而确定最佳方案。本研究通过对我国海南典型岛屿雨水径流的收集、采样和检测,系统分析了不同硬化集水面雨水径流污染物的排放特征、传输规律与不同阶段雨水的水质特征,并据此提出可行的弃流方案和分质收集方案,以期为岛屿地区现代化建设提供助力。

2 材料与方法(Materials and methods)

2.1 研究区域概况和降雨情况

本研究以海南岛文昌市作为主要的雨水监测区域。文昌市地处东经108°21'~111°03'E,北纬19°20'~20°10'N,为典型的热带海洋季风气候,年平均气温为24℃,平均降雨量为1799 mm。本研究在该地区于2017年12月—2018年1月选取多场降雨进行监测、采样,同时考察水泥路面和水泥屋顶两种集水面径流的水质情况,两种集水面面积分别为98.2 m²和34.2 m²,表1总结了两种硬化集水面不同降雨事件的基本降雨特征,包括降雨量、降雨历时、降雨强度和降雨间隔等。

表 1 降雨情况

Table 1 Characteristics of investigated rainfalls

集水面类型	降雨事件	日期	降雨量/mm	降雨历时/h	降雨强度/(mm·h ⁻¹)	雨前干期/d
水泥路面	E1	2017-12-13	3.2	0.42	7.62	10
	E2	2017-12-28	3.7	0.83	4.45	2
	E3	2018-01-04	3.2	0.75	4.27	6
水泥屋顶	E4	2017-12-26	2.2	1.00	2.20	14
	E5	2017-12-28	4.2	0.83	5.06	2
	E6	2018-01-04	4.0	0.83	4.82	6

2.2 监测方法

水泥屋顶径流样品在屋顶落水管末端采集,水泥马路径流样品在路面汇水口处收集。采样时,以单次降雨形成径流时的时间作为零点并采集样品,形成径流后的 0~30 min 内,每隔 5 min 取样 1 次,并测量浊度和色度,30 min 后采样间隔增加为 10 min 并同时监测瞬时样品的浊度和色度。单次降雨事件的降雨量数据由采样点附近的翻斗式雨量计进行记录。

采用容积法监测水泥屋顶和水泥路面雨水径流流量,以地表径流形成时为零点,按上述取样方法分时段监测。监测时,在汇水处使用 500 mL 量筒收集雨水,测定收集 500 mL 雨水所需时间,所求径流量=收集雨水体积/时间。每个时段的径流量重复 3 次测定取平均值。

2.3 样品分析方法

根据《水和废水监测分析方法》(第四版)中的标准方法对雨水样品进行采集和保存。雨水的常规水质指标,如 TDS、浊度、色度等,在现场完成测定,检测完成后迅速将样品运至实验室立即完成其它理化指标的测定工作。其中,TDS 等采用便携式多参数水质分析测定仪(HI98194,哈纳沃德)测定;氨氮和色度使用哈希便携式分光光度计(DR1900)检测;浊度使用浊度仪(WZB-170,雷磁)检测;NO₃⁻采用离子色谱(ICP-1000)测定;TOC 由总有机碳测定仪(岛津,TOC-VCPH)测定。

2.4 数据分析

本文采用雨水径流污染物 $M(V)$ 曲线研究雨水径流中污染物的传输情况,通过量化雨水径流排放过程中累积污染物负荷比例 M 与累积径流量比例 V 的关系,判断径流中污染物的传输特性。 $M、V$ 按式(1)~(2)进行计算(Stenstrom *et al.*, 2005)。

$$M = \frac{M_{(t)}}{M_{(T)}} = \frac{\sum_0^t Q_t C_t \Delta t}{\sum_0^T Q_t C_t \Delta t} \quad (1)$$

$$V = \frac{V_{(t)}}{V_{(T)}} = \frac{\sum_0^t Q_t \Delta t}{\sum_0^T Q_t \Delta t} \quad (2)$$

式中 $M(t)$ 为 t 时刻累积污染物总量(mg); $V(t)$ 为 t 时刻累积径流总量(L); $M(T)$ 为单次降雨累积污染物总量(mg); $V(T)$ 为单次降雨累积径流总量(L); C_t 为 t 时刻径流污染物浓度(mg·L⁻¹); Q_t 为 t 时刻径流量(L·h⁻¹); Δt 为两次取样之间的时间间隔(h); T 为降雨径流事件总时间(h)。

由于单次降雨的不同时段内,雨水径流污染物的排放具有较强的随机性,因此利用降雨时间部分平均浓度(Partial Event Mean Concentration, PEMC)衡量降雨初期和降雨后期的径流污染物水平。前期雨水和后期雨水径流中污染物的平均浓度按式(3)进行计算(Yun *et al.*, 2010)。

$$PEMC = \frac{\int_{t_0}^{t_n} Q_t C_t dt}{\int_{t_0}^{t_n} Q_t dt} = \sum_{t_0}^{t_n} \frac{M_t}{V_t} \quad (3)$$

式中 t_0 为样品采集开始时刻; t_n 为样品采集结束时刻; Q_t 为 t 时刻径流流量(L·h⁻¹); C_t 为 t 时刻污染物浓度(mg·L⁻¹); M_t 为 t 时刻径流污染物质量(mg); V_t 为 t 时刻径流体积(L); PEMC 为 $t_0 \sim t_n$ 时间段内雨水径流污染物平均浓度(mg·L⁻¹)。

2.5 统计分析

作图由 Microsoft Excel(2019)完成,使用 IBM SPSS Statistics 软件(25.0 版)进行数据统计分析, Pearson 相关分析用于检验各指标之间的相关性。

3 结果与讨论(Results and discussion)

3.1 不同硬化集水面降雨初期冲刷特征

不同硬化集水面雨水径流中污染物的分布规

律是制定雨水弃流、收集方案的关键依据.通过降雨事件内的径流特征与径流污染物浓度,构建了雨水径流污染物 $M(V)$ 曲线(图 1),曲线与等分线的偏离程度作为分析初期冲刷现象的定性指标(牛司平等 2020).各污染物的 $M(V)$ 曲线均有不同程度的波动,大部分的曲线向等分线左侧偏离,即 M/V 的

比值大于 1,说明不同硬化集水面径流中的各污染物在大部分降雨事件中均发生了初期冲刷效应,污染物主要的传输过程发生于降雨前期.对于不同硬化集水面雨水径流中的各污染物曲线,其变化幅度均无明显差异,前 30% 的雨水径流能够转移 42%~50% 的污染物.

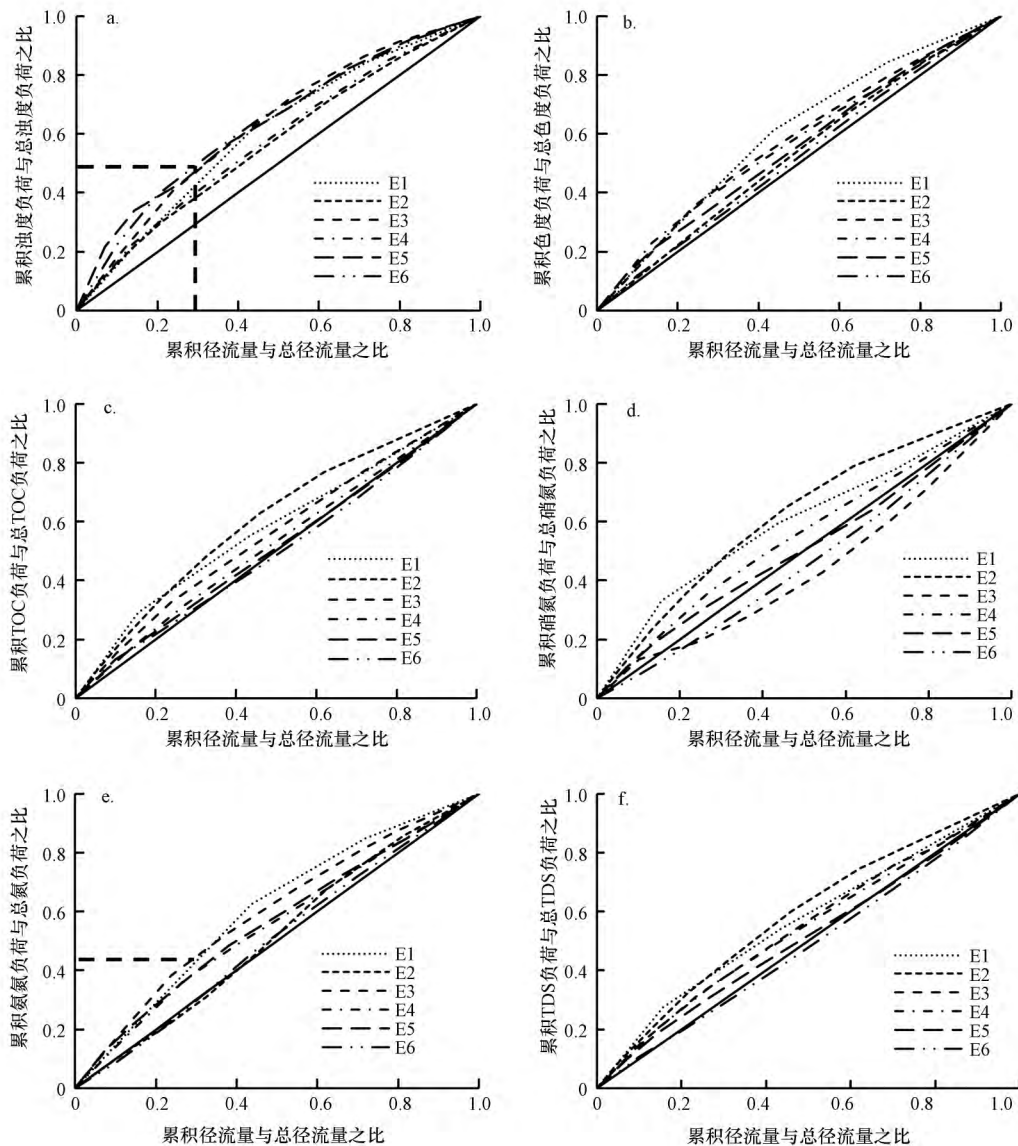


图 1 研究区域污染物累积负荷量随累积径流量的变化情况

Fig.1 Change of cumulative pollutant load with respect to cumulative volume

对于不同的污染物来说,浊度、TOC、 $\text{NO}_3\text{-N}$ 曲线与等分线的偏离程度更为明显,说明降雨径流中的颗粒物、有机物与硝氮均具有明显的初期冲刷效应.而对于色度、氨氮、TDS,曲线相对更接近等分线,说明在径流初期以上污染物浓度的变化幅度较小,且该污染物在整个径流中分布较为均匀,污染

物的传输过程在降雨事件中持续的发生(吴民山等 2020).此外,E3、E6 的硝氮曲线和 E6 的 TDS 曲线在等分线下,其中 E3 的硝氮曲线在发生初期冲刷后产生了明显的“下凹”,该结果与天津滨海临港工业园区道路、屋顶雨水径流中的污染物传输规律一致(吴民山等 2020).TDS 和硝氮均为溶解性污

染物,在未发生降雨前附着于集水面表面以及沉积的颗粒物上。在降雨初期,受雨水冲刷、再悬浮等效应的影响,集水面上颗粒物中的污染物首先被解吸附、溶出。而到降雨中期和后期,随着降雨冲刷、径流浸泡时间的增加,附着于集水面表面上或来自于材料自身的溶解性污染物被析出,由于集水面上径流量的不断增加,污染物被稀释,导致 TDS 和 $\text{NO}_3\text{-N}$ 负荷与径流量的比例减小,也说明以上污染物在不同的硬化集水面径流中的传输规律均存在较大的变异性,其输出能力受污染物自身特性的影响。

3.2 不同硬化集水面降雨径流水质评估

根据不同集水面径流初期冲刷特征,可将前 30% 和后 70% 径流分别定义为前期雨水和后期雨水。在对不同集水面前期雨水和后期雨水污染物平均浓度进一步分析计算中发现(图 2),前期雨水中的大部分污染物浓度高于后期雨水,且不同集水面的污染物浓度水平也存在显著的差异($p < 0.01$)。

如图 2a 所示,水泥路面前期雨水浊度平均值(555.6~1285.1 NTU)和水泥屋顶前期雨水浊度平均值(4.4~43.6 NTU)均远高于后期雨水(261.6~722.2 NTU 和 1.9~27.2 NTU),且水泥路面雨水径流浊度整体高于水泥屋顶。通过与生活饮用水卫生标准(GB5749-2006)和城市杂用水水质标准(GBT18920-2002)对比,晴日间隔较短的降雨事件(E5、E6)产生的屋顶后期雨水浊度接近饮用水标准(≤ 1 NTU),水泥路面后期雨水可满足绝大部分城市杂用水标准。屋顶雨水径流中的颗粒物主要来自于大气沉降、屋顶材料腐蚀剥落,来源较单一,水质情况相对较好。而路面上的颗粒物来源更为复杂,可能来自车辆遗撒、轮胎磨损、生活垃圾、尾气排放等(Sansalone *et al.*, 1997; Gunawardana *et al.*, 2012; Gunawardana *et al.*, 2014),导致水泥路面雨水的浊度远高于水泥屋顶。

3.2.2 色度 对于色度来说,水泥路面降雨径流的前期雨水色度平均值(4209.1~10820.0 Pt-Co)与后期雨水(2507.0~6253.9 Pt-Co)差异较大,而水泥屋顶集水面前期雨水色度平均值(59.0~653.6 Pt-Co)与后期雨水(54.2~404.5 Pt-Co)相比差异较小。但两种硬化集水面的雨水径流中的色度均高于生活饮用水卫生标准(≤ 15 Pt-Co)和城市杂用水标准中对色度的规定限值(≤ 30 Pt-Co)。雨水径流的色度高低主要受颗粒物浓度和溶解性物质含量的调控(姚国等, 2008),由于 E1、E4 降雨事件前的晴日时

间较长,而不同硬化集水面上累积的颗粒物浓度已趋近最大值(Yuan *et al.*, 2017),受初期冲刷效应影响,降雨前期径流中的悬浮颗粒物含量较多,因此,水泥路面和水泥屋顶的雨水径流表观色度受此影响表现出较高水平,且前期雨水色度值远高于后期雨水($p < 0.01$)。而 E2、E3、E5、E6 降雨事件前的晴日时间较短,颗粒物累积较少,溶解性物质对色度的影响较为显著。溶解性污染物的来源不仅与周边环境及土地利用方式有关,也与集水面自身材料特性有关。用于构建屋顶的水泥材料中含有均湿剂材料(姚启均, 1996),该材料由含有锂、钠、钾、钙的无机盐或多羟基化合物构成,海南地区高温潮湿环境易造成水泥屋顶腐蚀风化,经雨水浸泡后析出以上物质,而该释放过程持续时间较长,所以不同硬化集水面初期雨水的色度与后期雨水差异性较小($p > 0.05$)。至于本研究中水泥屋顶材料释放的具体物质和释放机制尚不明确,需进一步探究。

3.2.3 TDS、氨氮和硝酸盐 根据图 2c~2e 显示,两种集水面各时段雨水径流中 TDS 和硝酸盐指标均低于饮用水标准中的规定限值(TDS ≤ 1000 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$; 硝酸盐 ≤ 10 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)。水泥屋顶径流中的硝酸根含量高于水泥路面($p < 0.05$)。此外,水泥路面初期雨水中氨氮浓度高于饮用水标准的规定限值,但可满足杂用水水质标准(氨氮 ≤ 10 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$),而水泥屋顶各时段降雨径流均低于生活饮用水对氨氮的规定限值。受大气沉降、降雨特征、硬化集水面特性以及污染物来源的影响,不同集水面降雨径流中氮类污染物浓度变化幅度较大。另外,径流中的氨氮、硝氮等氮类污染物在传输过程中其赋存形态受集水面地形、用地类型、降雨强度、径流来源等因素的影响,在不同的硬化集水面径流中的氮类污染物迁移转化程度具有较大的差异性(何强等, 2012),因此氨氮、硝氮污染物浓度水平也存在较大差异。

3.2.4 TOC 由于水泥路面径流中污染物的来源更为复杂,其 TOC 含量也高于水泥屋顶径流中的 TOC 含量。对于不同时间段的雨水来说,在两种硬化集水面的前期、后期雨水径流中都发现了较高含量的 TOC(由于 TOC 尚未正式列入我国生活饮用水水质指标,目前仅将该指标列在资料性附录中,规定的可参考限值为 5.0 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$),其中水泥路面后期雨水的 TOC 浓度明显低于初期雨水($p < 0.05$)。水泥屋顶后期雨水中的总有机碳含量低于前期雨水,但差异性较小($p > 0.05$)。这可能与屋顶材料中释放的有机物有关。

综上所述,两种硬化集水面后期雨水水质均好于前期雨水,水泥屋顶后期雨水径流水质优于水泥路面。其中,水泥屋顶后期雨水水质接近饮用水标准,

而水泥马路后期雨水水质接近生活杂用水标准。因此,根据不同硬化集水面的水质规律,通过合理的弃流,即可制定可行性较高的分质收集方案。

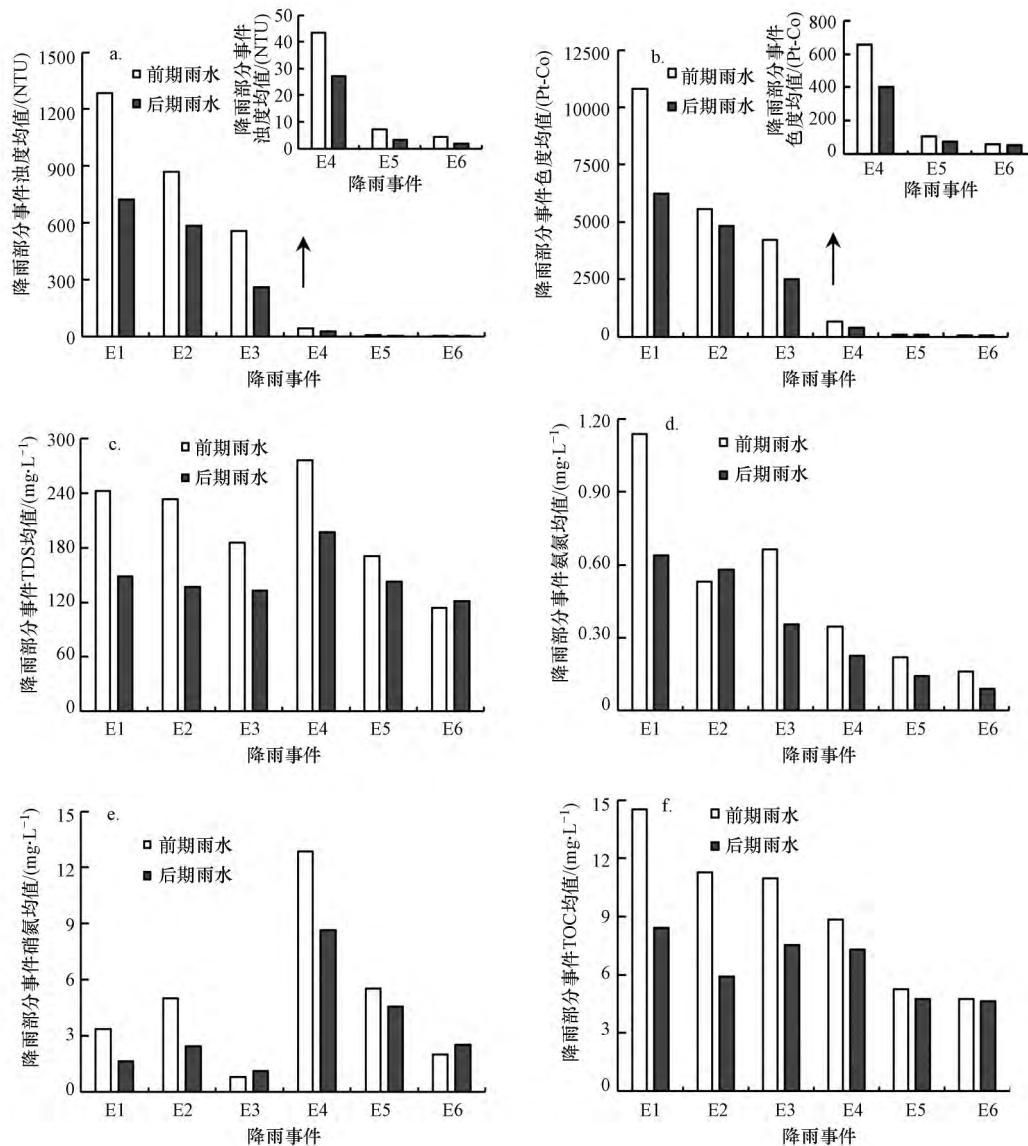


图2 研究区域主要污染物不同时段平均浓度

Fig.2 Mean concentration of major parameters in different rainfalls periods

3.3 不同硬化集水面弃流方案

由于前30%的雨水径流携带了42%以上的污染物,造成了其污染物浓度较高。但由于降雨的不确定性和时空特异性,以径流体积为标准制定的弃流方案极易导致无法最大化地利用雨水资源。因此,利用实际的降雨条件(降雨量、降雨强度、降雨时间和雨前干期)和监测数据建立经验模型,预测污染物浓度分布情况并提出弃流方案是保障可收集雨水水质、水量安全的必要措施。

弃流雨量的确定应以当地硬化集水面径流中的特征污染物浓度作为一般性的量化指标。Pearson相关性分析结果(表2)显示,不同硬化集水面径流中的浊度与色度、TDS、氨氮、硝酸盐和TOC均显著相关,说明该地区不同硬化集水面径流中的特征污染物主要在硬化集水面径流中的颗粒物中赋存,通过转移降雨前期高浊度的径流可大幅削减初期雨水中的特征污染物。因此,对于当前研究地区,可以不同硬化集水面径流的浊度值作为弃流标准,根据

不同降雨条件下浊度的变化规律, 确定相应的基础弃流量, 制定合理的弃流方案.

表 2 雨水径流中污染物之间的关系

Table 2 Relationship between contaminants in rainfall runoff

集水面类型	污染物	浊度	色度	TDS	NH ₄ -N	NO ₃ -N	TOC
水泥路面	浊度	1	0.915**	0.799**	0.812**	0.700**	0.717**
	色度		1	0.612**	0.919**	0.486*	0.616**
	TDS			1	0.540*	0.772**	0.921**
	NH ₄ -N				1	0.260	0.599**
	NO ₃ -N					1	0.549*
	TOC						1
水泥屋顶	浊度	1	0.990**	0.911**	0.829**	0.928**	0.935**
	色度		1	0.914**	0.820**	0.933**	0.932**
	TDS			1	0.859**	0.970**	0.930**
	NH ₄ -N				1	0.793**	0.832**
	NO ₃ -N					1	0.907**
	TOC						1

注: * 在 0.05 水平上显著相关(双侧), ** 在 0.01 水平上显著相关(双侧).

暴雨径流中对浊度响应最大的是 50 μm 以下的颗粒物, 而该颗粒物在径流中的迁移转化过程属

于源受限过程(Yuan *et al.*, 2019), 导致路面和屋顶径流中的浊度和降雨量呈指数衰减的关系(图 3).

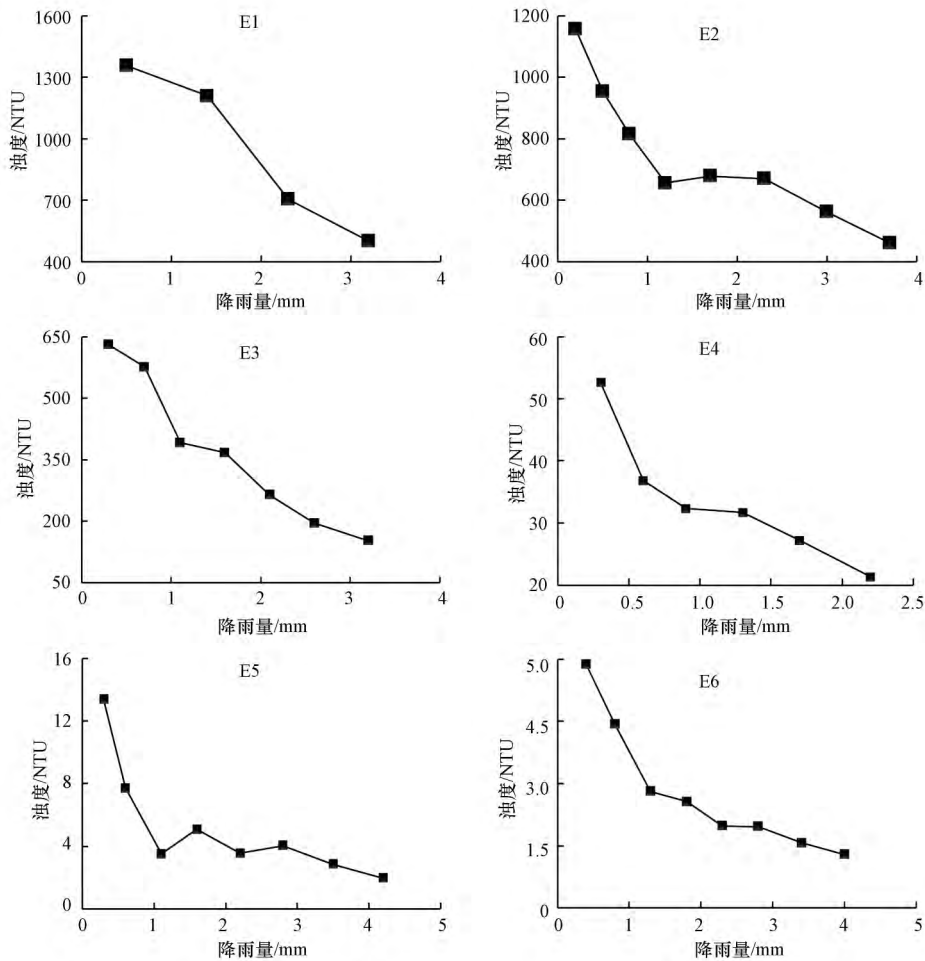


图 3 浊度与降雨量的关系

Fig.3 Relationship between turbidity and rainfall

因此,可通过 Sartor&Boyd 模型(Sartor *et al.* , 1972) 对降雨过程中浊度的变化进行模拟,构建相应的经验公式,并根据不同硬化集水面径流中的浊度变化范围制定相应的浊度标准,计算弃流雨量.其模型表达式如下:

$$N = N_0 \times e^{-kt} = N_0 \times e^{-kR} \quad (4)$$

式中 N 为径流浊度(NTU); N_0 为径流最大初始浊度(NTU); k 为径流冲刷系数; t 为降雨强度($\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$); R 为降雨量(mm).

径流的最大浊度,主要受两次降雨事件之间路面或屋顶上的污染物积累量影响,而在晴日硬化集水面上积累的污染物负荷量与晴日天数呈幂函数关系.所以径流中初始最大浊度的估算按式(5)计算.

$$N_0 \cong a \times \text{ADD}^b \quad (5)$$

式中,ADD 为两次降雨事件间隔天数; a 和 b 为经验常数.

将式(5)带入式(4)中可得:

$$N = a \times \text{ADD}^b \times e^{-kR} \quad (6)$$

分别将水泥路面和水泥屋顶的数据带入公式(6)中,对模型校准后,可得如下公式:

$$N = 279.97 \times \text{ADD}^{0.78} \times e^{-0.32 \times R} \quad (7)$$

$$N = 0.01 \times \text{ADD}^{6.24} \times e^{-0.46 \times R} \quad (8)$$

模型的拟合结果如图4所示,路面和屋顶径流浊度的预测值和实测值的最佳拟合线斜率分别为0.9852和0.9841,且拟合线的相关系数(R^2)分别为0.9852和0.9840,说明模拟值和实测值相关性极为显著,预测结果较好.

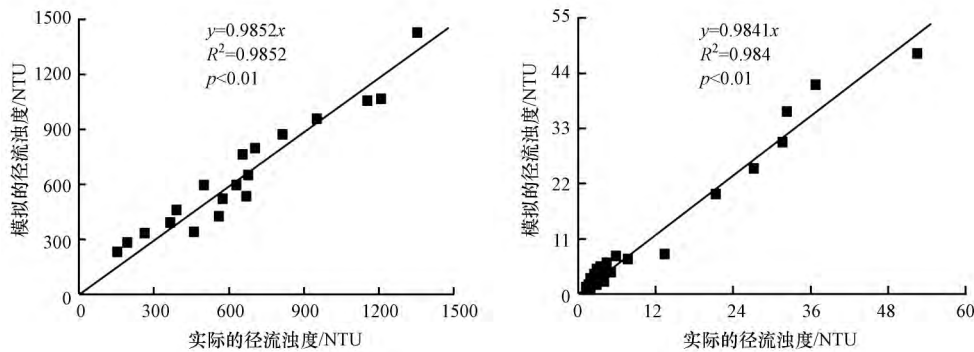


图4 实际径流浊度和模拟径流浊度的比较

Fig.4 Comparison of actual runoff turbidity and simulated runoff turbidity

为了确定弃流雨量(R),公式(7)、(8)可变形为:

$$R = -\frac{1}{0.32} \ln\left(\frac{N}{279.97 \times \text{ADD}^{0.78}}\right) \quad (\text{水泥路面}) \quad (9)$$

$$R = -\frac{1}{0.46} \ln\left(\frac{N}{0.01 \times \text{ADD}^{6.24}}\right) \quad (\text{水泥屋顶}) \quad (10)$$

根据研究地区降雨特点,ADD 可取值 3、5 和 7 d.同时,按照常规的弃流标准,通过弃流系统后的屋顶和路面径流浊度(N)可分别取值 3~20、10~30 和 50~90 NTU.弃流雨量可通过式(9)和(10)求得,其结果见表3.因此,可根据该标准建立弃流系统,做到最大化去除初期雨水中污染物的同时,减少因过度弃流导致的水资源浪费:

①对于水泥屋顶,径流对屋顶污染物的冲刷更加彻底,污染物不易在屋顶累积.因此,弃流后的径流浊度可以 8 NTU 为标准,去除降雨初期前 0.29 mm 的降雨径流.若雨前干期过长,颗粒物将会大量

累积.径流的弃流标准建议为 20 NTU,同时转移降雨初期前 1.72 mm 的降雨.

②水泥马路为不透水路面,径流流速更快,污染物在径流中的迁移和传输更加频繁、迅速,径流携带的污染物负荷量更大.因此,路面径流的浊度标准建议以 50 NTU 为标准,并弃流前 10 mm 雨水.

表3 不同弃流浊度情况下的弃流量
Table 3 Diverted rainfall under different conditions

汇水面	弃流浊度/NTU	弃流量/mm		
		ADD=3 d	ADD=5 d	ADD=7 d
水泥屋顶	5	1.31	4.71	9.65
	8	0.29	3.71	7.53
	20	0.00	1.72	5.54
水泥路面	50	7.96	9.19	10.00
	70	6.92	8.15	8.96
	90	6.15	7.37	8.18

3.4 不同硬化集水面雨水分质收集方案

岛屿地区工业化程度较轻,受点源污染影响较小(蒋云飞,2012),降雨作为自然的水循环过程,可在极大程度上丰富岛屿地区的水资源储备,但在其形成过程中出现的面源污染直接影响了雨水收集利用的效率和效益。此外,不同硬化集水面径流的水质和污染物来源存在较大差异,水泥屋顶收集雨水径流受环境因素影响较小、污染程度较低且来源较单一,而路面雨水径流污染物浓度高且成分、来源更为复杂,二者在水质上存在较大的差异也导致了其适用范围的差别。因此,需根据雨水水质规律的不同,因地制宜地提出收集方案,从而更科学、有效、充分地利用雨水资源。

目前,全球各地依据当地用水需求、气候环境、饮水文化等因素形成了多种雨水收集利用模式。贫穷缺水地区在收集雨水时更加注重可收集雨水的总量,但收集过程中往往缺少对水质的控制(Abdulla *et al.*,2009; Myint *et al.*,2015)。而经济发达地区雨水收集更倾向控制径流体积,减少面源污染的传输路径,因而通过增加弃流量提升雨水水质,但收集雨水总量相对较少,仅用于中水回用(赵慧芳,2008; Kirs *et al.*,2017)。因此,雨水的收集和利用主要受到其使用方式的影响,而岛屿地区由于其地理位置的特殊性,用水方式更加多元化。在本研究中,通过对不同硬化集水面雨水径流的水质规律分析发现,路面径流污染物浓度显著高于屋顶雨水,而后期雨水的污染物浓度较低,且雨水径流中大部分污染物在颗粒物中赋存,所以根据上述弃流方案,以浊度为标准收集的水泥屋顶雨水径流经弃流后可接近饮用水标准(<8 NTU),经过深度净化可直接用于饮用目的,弃流后的路面径流可接近城市杂用水标准(<50 NTU),可在沉淀、过滤处理后作为城市杂用水使用。但不同集水面的雨水收集、储存和净化方式仍需进一步详细讨论。

由于岛屿地区大部分建筑的屋顶为水泥平面屋顶,因此可采用粗筛网去除雨水径流中的枯枝落叶等大型杂物。当屋顶径流产生后,雨水通过落水管进入弃流系统(图5)。弃流系统可依据当地降雨条件和现场监测数据,根据屋顶面积和不同降雨条件所对应的弃流标准设置相应的弃流体积,保证最大化收集高质量雨水。考虑到岛屿日照时间较长、气温较高,雨水存储罐长期暴晒可能会导致有机物的溶出、藻类、微生物滋生,因此采用埋地式储水系

统,在避免阳光直射的同时,节约占地面积。针对旱季降雨较少,无法保障居民饮用水水量安全的情况,应在储水单元后额外增加小型储水模块,收集雨季溢流雨水补充旱季用水。

饮用水标准对水质要求较高,尤其是氨氮、有机物、颗粒物和微生物等污染物规定限值更为严苛,简单的过滤、沉淀等物化方法难以去除并满足相应的水质要求,而高成本、高维护、高操作要求等因素限制了超滤、反渗透技术等新兴净水工艺在岛屿地区的推广使用。因此可采用物化法和生物法相结合的低成本净水技术,如生物慢滤和无动力超滤工艺等。生物慢滤通过表层的生物层、内部垂直生态结构和介质本身的物化性质,可有效去除雨水中的颗粒物、病原菌、有机物、氨氮等污染物质,使出水达到饮用水标准(Srishti *et al.*,2017)。而无动力超滤技术以水自身重力驱动,雨水中的颗粒物被滤膜拦截,富集在滤膜表面生物滤饼层中的微生物群落通过捕食、同化、降解等作用去除雨水中的病原菌、有机物、氨氮等(Pronk *et al.*,2019)。此外,还可在雨水储存装置中设置UV-LED紫外消毒模块,减少储存过程中微生物的滋生,保证居民饮水安全(Song *et al.*,2016)。

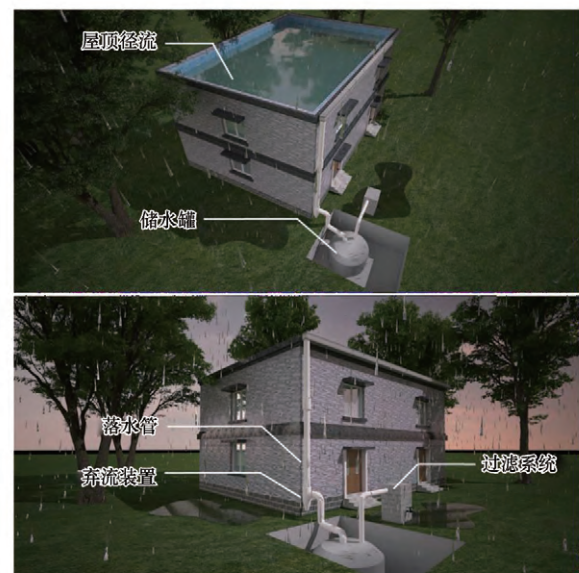


图5 屋顶雨水收集系统

Fig.5 Roof rainwater collection system

路面雨水污染物复杂程度远超过屋顶径流,相较于屋顶雨水,路面径流所携带的污染种类更为繁杂,尤其是在颗粒态污染物。且由于一般道路路面主要采用不透水材料,汇水面积更广,导致在中到

大雨时,路面雨水大量汇集,径流的流向更难以掌控,收集难度更高。通常情况下,路面径流的收集由路面的雨水口和地下导管完成(图 6a),雨水汇集至雨水口,经地下导管进入初期雨水弃流系统,排入沉淀池,经过一段时间的处理,进入过滤系统,并最终流入雨水蓄水池。但由于路面的径流体积过大,提高了所需弃流装置和收集池的体积,增加了占地面积和后续处理成本。同时,当弃流、沉淀装置满负荷时,多余的径流将溢出收集系统,汇入附近的水体造成污染。

针对常规路面雨水收集系统承载量小且净水成本较高的问题,路面雨水的收集工作可利用源头

分散的小型控制设施,维持和保护路面周围环境的自然水文功能,缓解径流和洪峰流量的大幅增加。同时利用自然水循环系统,高效地回收产生的雨水,并在回收的过程中减少污染负荷。因此,路面产生的径流可采用土壤入渗、植物截留、自然沉淀等生态方法协同作用,实现对雨水更为经济、高效的处理与收集。如图 6b~6c 所示,依托岛屿地区的环境优势,在道路两侧设置生物滞留池和植被浅沟等,分流降雨初期产生的高浊度径流,并在低洼处汇集降雨中后期产生的低浊度径流,通过过滤、渗透作用去除其中的污染物,并最终汇入雨水收集系统。

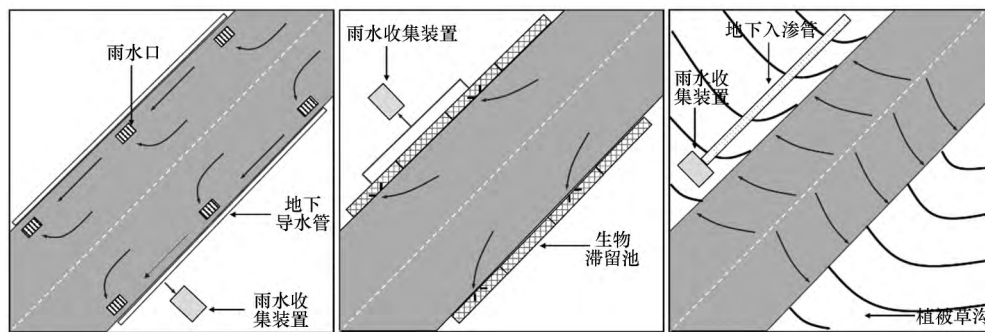


图 6 路面雨水收集方案

Fig.6 Road rainwater collection scheme

4 结论(Conclusions)

1) 两种硬质化集水面雨水径流均发生明显的初期冲刷效应,前期雨水的污染物浓度整体高于后期雨水;水泥屋顶雨水径流经进一步深度净化,可作为合适的饮用水水源,水泥路面雨水径流可经简单处理作为城市杂用水使用。

2) 根据 Pearson 相关性系数分析,雨水中主要污染物质与浊度显著相关。通过以浊度为基础建立的路面弃流方案确定了相应的弃流标准:水泥屋顶晴日时间较短时,建议以 8 NTU 为标准,转移降雨初期前 0.29 mm 降雨径流,晴日时间过长则以 20 NTU 为标准,转移降雨初期前 1.72 mm 降雨;水泥路面建议以 50 NTU 为标准,并弃流前 10 mm 雨水。

3) 针对水泥屋顶硬质化集雨面,提出了家庭雨水收集方案,利用水泥屋顶集雨面收集雨水,经粗筛网拦截雨水中的树叶等大型杂物,再进入弃流装置,最后进入埋地式储水系统,完成集雨;针对水泥路面雨水径流污染物复杂程度高、污染物浓度大、

径流量大等特点,提出了利用土壤入渗、植物截留、自然沉淀等多种生态方法协同作用的雨水净化技术,降低雨水净化成本。

参考文献(References):

- Abdulla F A, Al-Shareef A W. 2009. Roof rainwater harvesting systems for household water supply in Jordan [J]. *Desalination*, 243(1/3): 195-207
- Abdulla F A, Al-Shareef A W. 2009. Roof rainwater harvesting systems for household water supply in Jordan [J]. *Desalination*, 243(1/3): 195-207
- Cunliffe D A. 1998. Guidance on the use of rainwater tanks [C]. National Environmental Health Forum
- Fonseca C R, Hidalgo V, Diaz-Delgado C, et al. 2017. Design of optimal tank size for rainwater harvesting systems through use of a web application and geo-referenced rainfall patterns [J]. *Journal of Cleaner Production*, 145: 323-335
- Gunawardana C, Goonetilleke A, Egodawatta P, et al. 2012. Role of solids in heavy metals buildup on urban road surfaces [J]. *Journal of Environmental Engineering*, 138: 490-498
- Gunawardana J, Ziyath A M, Egodawatta P, et al. 2014. Mathematical relationships for metal build-up on urban road surfaces based on

- traffic and land use characteristics [J]. *Chemosphere*, 99: 267-271
- 何强, 彭述娟, 王书敏, 等. 2012. 不同下垫面暴雨径流氮赋存形态分布特性及控制技术 [J]. *土木建筑与环境工程*, 34(5): 141-147
- 姜海波, 赵云鹏, 程忠庆. 2014. 偏远岛屿就地供水保障模式分析 [J]. *中国工程科学*, 16(3): 99-102
- 蒋云飞. 2012. 海岛开发研究的新进展及展望 [J]. *中国城市研究*, 7(2): 117-123
- Kirs M, Moravec P, Gyawali P, et al. 2017. Rainwater harvesting in American Samoa: Current practices and indicative health risks [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 24 (13): 12384-12392
- Liu X D, Zhao S P, Sun L G, et al. 2006. Geochemical evidence for the variation of historical seabird population on Dongdao Island of the South China Sea [J]. *Journal of Paleolimnology*, 36(3): 259-279
- 刘志勇. 2016. 昆明市城市住宅小区雨水水质特性及资源化研究 [D]. 昆明: 昆明理工大学
- Martinson B, Thomas T. 2005. Quantifying the first flush phenomenon [C]. 12th International Rainwater Catchment Systems Conference
- Myint S L T, Myint T, Aung W W, et al. 2015. Prevalence of household drinking water contamination and of acute diarrhoeal illness in a periurban community in Myanmar [J]. *WHO South-East Asia Journal of Public Health*, 4(1): 62-68
- 牛司平, 袁庆科, 金永喆. 2020. 高速公路路面雨水径流污染物排放特征研究 [J]. *环境科学学报*, 40(9): 3311-3322
- Pronk W, Ding A, Morgenroth E, et al. 2019. Gravity-driven membrane filtration for water and wastewater treatment: A review [J]. *Water research*, 149: 553-565
- 秦语涵, 王红武, 张一龙. 2016. 城市雨洪径流模型研究进展 [J]. *环境科学与技术*, 39(1): 13-19
- Sample D J, Liu J. 2014. Optimizing rainwater harvesting systems for the dual purposes of water supply and runoff capture [J]. *Journal of Cleaner Production*, 75: 174-194
- Sansalone J J, Buchberger S G. 1997. Partitioning and first flush of metals in urban road way storm water [J]. *Journal of Environmental Engineering*, 123(2): 134-143
- Sartor J D, Boyd G B. 1972. Water pollution aspects of street surface contaminants [M]. US Government Printing Office.
- Song K, Mohseni M, Taghipour F. 2016. Application of ultraviolet light-emitting diodes (uv-leds) for water disinfection: a review [J]. *Water Research*, 94(May1): 341-349
- Stenstrom M K, Kayhanian M. 2005. First flush phenomenon characterization [R]. California Department of Transportation Division of Environmental Analysis
- Verma S, Daverey A, Sharma A. 2017. Slow sand filtration for water and wastewater treatment: a review [J]. *Environmental Technology Reviews*, 6(1): 47-58
- 王岚, 张其成, 陈星. 2013. 住宅小区雨水收集利用方案及其效益分析 [J]. *水资源保护*, 29(2): 67-70
- 吴民山, 李思敏, 张文强, 等. 2020. 天津滨海临港工业园区径流污染特征及其控制策略 [J]. *环境工程学报*, 14(12): 1-12
- 姚国 王建卫. 2008. 污水色度的测定 [J]. *理化检验(化学分册)*, (1): 61-62+65
- 姚启均. 1996. 特种屋顶水泥 [J]. *建材工业信息*, (23): 10
- Yaziz M I, Gunting H, Sapari N, et al. 1989. Variations in rainwater quality from roof catchments [J]. *Water Research*, 23(6): 761-765
- Yuan Q, Guerra H B, Kim Y. 2017. An investigation of the relationships between rainfall conditions and pollutant wash-off from the paved road [J]. *Water*, 9(4): 232
- Yuan Q, Guerra H B, Kim Y. 2019. Laboratory and field application of the synthetic fiber filter for treating turbid stormwater [J]. *Desalination and Water Treatment*, 154: 119-131
- Yun Y, Park H, Kim L, et al. 2010. Size distributions and settling velocities of suspended particles from road and highway [J]. *Ksce Journal of Civil Engineering*, 14(4): 481-488
- 赵慧芳. 2008. 城市道路雨水就地利用技术研究 [D]. 北京: 北京林业大学
- 赵磊, 杨逢乐, 袁国林, 等. 2015. 昆明市明通河流域降雨径流水量水质 SWMM 模型模拟 [J]. *生态学报*, 35(6): 1961-1972
- 郑毅, 曹建山, 刘宝山, 等. 2009. 对初期雨水径流弃流问题的探讨 [J]. *中国给水排水*, 25(19): 106-108