Eco-Environmental Knowledge Web

环境工程学报

Chinese Journal of Environmental Engineering

第13卷 第4期 2019年4月

Vol.13, No.4 Apr. 2019

http://www.cjee.ac.cn E-mail: cjee@rcees.ac.cn (010) 62941074

文章栏目:水污染防治

DOI 10.12030/j.cjee.201812075 中图分类号 X522 文献标识码 A

姚国庆, 孟颖, 张博, 等. 岛屿环境下水泥屋顶和水泥路面雨水径流水质特性及其用作饮用水的可行性[J]. 环境工程学报, 2019, 13(4): 800-809.

YAO Guoqing, MENG Ying, ZHANG Bo, et al. Water quality characteristic of rainfall runoff on the cement roof and cement road in the island environment and its feasibility as the drinking water resource[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2019, 13(4): 800-809.

岛屿环境下水泥屋顶和水泥路面雨水径流水质特性及其用作饮用水的可行性

姚国庆[1,2],孟颖[1],张博[1],李媛[1],胡民火[1,3],刘文彬[1,4],赵子旺[1,4],刘添[1,5],胡振[2],栾富波[1,4,*]

1. 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
2. 山东大学环境科学与工程学院，青岛 266237
3. 江西理工大学建筑与测绘工程学院，赣州 341000
4. 中国科学院大学，北京 100049
5. 湖南大学，化学生物传感与计量学国家重点实验室，长沙 410082

第一作者：姚国庆(1994—)，男，硕士研究生。研究方向：雨水收集利用及其饮用水化。E-mail：yaogq2016@163.com

*通信作者：栾富波(1980—)，男，博士，研究员。研究方向：污染物迁移转化过程与控制技术。E-mail：fbluan@rcees.ac.cn

摘　要　以岛屿典型集水面(水泥路面和水泥屋顶)的雨水径流为研究对象，系统分析了雨季和旱季雨水径流的水质历时变化特征，并对岛屿收集雨水用作饮用水的可行性进行了分析。结果表明：雨季由于降雨强度大且降雨集中，水质明显好于旱季；屋顶受环境及人为因素干扰小，水质好于路面。建议收集雨水顺序为雨季屋顶>旱季屋顶>雨季路面，旱季路面水质较差，不建议收集。岛屿不同环境下收集的雨水水质分析结果表明，超出生活饮用水卫生标准的指标主要有色度、浊度、少量金属(铝和铅)、氨氮、有机物和微生物等，且超标指标在降雨初期随降雨时间的增加而迅速降低，之后逐渐趋于稳定。因此，对初期雨水进行弃流可极大改善收集雨水水质。雨水径流饮用水化可行性分析结果表明，根据降雨情况和集水面性质，采取合理的弃流方案并结合过滤和消毒等净化工艺，可实现雨水饮用水化。研究结果可为降雨量丰富的岛屿及东南亚和南亚的“一带一路”沿线国家利用雨水解决饮用水问题提供借鉴。

关键词　屋顶径流；路面径流；水质特性；饮用水；岛屿环境

饮用水危机一直是人类面临的严峻挑战[1]，目前全世界有近1/5的人口缺少清洁饮用水[2]。我国部分地区面临的饮用水危机主要表现在水资源短缺、分布极不均衡和水体污染严重等方面[3]，特别是部分沿海及南沙、西沙等岛屿均缺少饮用水。岛屿中饮用水需靠船运补充或海水淡化，成本较高，限制了岛屿的进一步发展[4-5]。“一带一路”沿线的东南亚和南亚许多国家同样面临严峻的饮用水安全问题。孟加拉国由于地下水砷污染严重，数千万人饮用水安全无法得到保障[6]；斯里兰卡北中部地下水源存在硬度、氟及硝酸盐等污染[7]，严重威胁当地居民健康。因此，开发安全和卫生的饮用水源成为亟待

收稿日期：2018-12-11；**录用日期**：2019-02-12

基金项目：国家重点研发计划课题(2016YFC0305401)；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

环境工程学报版权所有

解决的问题。雨水是河流、湖泊和地下水的首要补充源，雨水的收集利用被认为是解决水危机的重要途径，已引起了广泛的关注[8]。

我国南沙、西沙等岛屿以及“一带一路”沿线的东南亚和南亚国家主要以热带季风气候为主，降雨量丰富。如斯里兰卡各地年均降雨量在800~2 500 mm之间[9]，孟加拉国年降雨量最高可达4 300 mm[10]，因此，可以考虑通过收集雨水用作饮用水，解决当地饮用水安全问题。海南岛是21世纪海上丝绸之路重要支点，也是中国与南亚、东南亚等国海上交往的最前沿。海南岛上各地区年均降雨量在1 300~2 439 mm不等[11]，且气候环境与东南亚和南亚国家类似，均具有明显的雨季和旱季。因此，在海南岛开展相关研究工作既可为国内岛屿雨水饮用水化提供数据支持，也可为“一带一路”沿线的东南亚和南亚国家解决饮用水安全问题提供参考。

自然雨水水质一般较好，但气候环境差异和集水面材质等因素对收集雨水的水质有较大影响。LEE等[12]发现，雨水样品中微生物和阴阳离子浓度均受季节性影响较大。而雨水形成径流过程中首先与集水面接触，因此，集水面材质对水质有着至关重要的影响。有研究[13-14]发现，金属、混凝土或黏土材质集水面收集的雨水水质更好。目前，雨水收集用作饮用水的水质研究主要集中在屋顶集水面[13,15]，但屋顶集水面面积有限，收集雨水量少，而路面等水泥硬化面在岛屿上广泛存在，可作为潜在的大规模雨水收集汇水面。为实现雨水径流的饮用水化，水质分析是首先需要解决的问题。因此，本研究将以海南岛为研究对象，分别考察不同季节(雨季、旱季)条件下水泥路面和水泥屋顶2种集水面的雨水径流水质情况，明确不同条件下雨水水质特点和历时变化规律，通过对水质分析来评估雨水用作饮用水的可行性，为岛屿及东南亚、南亚等“一带一路”沿线国家利用雨水解决饮水危机提供借鉴。

1　研究区域概况

海南岛地处东经108°37′E~111°03′E，北纬18°10′N~20°10′N[11]，四周地势低平，中间高耸，具有典型的雨季和旱季。一般5—10月是雨季，7—8月降雨比较集中；11月—翌年4月是旱季，降雨量较少。本研究分别针对雨季和旱季选取3场典型降雨进行采样分析，同时考察水泥路面和水泥屋顶2种集水面径流水质情况。选取降雨的基本信息如表1所示。

2　样品采集与分析方法

2.1　样品采集方法

不同季节和不同集水面的雨水径流样品采集方法一致，均将每场降雨形成径流时的时间记为零点并开始取样，形成径流0~30 min内，采样间隔为5 min，30 min后，采样间隔增加为10 min[16-17]。将翻斗式雨量计安装在采样点附近，记录降雨量历时变化数据。此外，由容器直接收集每场降雨中自然降落的雨水作为空白，与集水面收集样品同时进行相关指标测定。用于测定微生物指标的取样瓶前期均已进行灭菌处理。

表1　雨季和旱季的典型降雨基本信息

Table 1　Basic information of typical rainfall in rainy and dry seasons

季节	降雨场次	降雨前晴天时间/d	降雨量/mm
雨季	1	2	31.1
	2	1	40.7
	3	0.5	17.5
旱季	4	5	1.6
	5	2	1.8
	6	1	2.9

2.2　样品分析方法

根据生活饮用水标准检验方法(GB/T 5750-2006)和《水和废水监测分析方法(第4版)》进行雨水样品的采集和保存。pH和溶解氧等采用便携式多参数水质分析测定仪(HI 98194，哈纳沃德)现场测定；氨氮和色度等指标使用哈希便携式分光光度计(DR 1900)和哈希多功能消解仪(DRB 200)现场测定；浊度使用浊度仪(WZB-170，雷磁)现场测定；阴离子指标(氯离子、硫酸根离子、硝酸根离子等)采用离子色谱(ICS-1000，戴安)测定；金属离子(铁、铝、镁等)使用ICP-MS(NexION 300X，PERKIN ELMER)测定；

环境工程学报版权所有

样品中总有机碳浓度由总有机碳测定仪(岛津，TOC-VCPH)测定；石油类指标采用红外分光光度法(HJ 637-2012)进行测定；微生物类指标测定的依据为生活饮用水标准检验方法(GB/T 5750-2006)，其中菌落总数采用平皿计数法测定，总大肠菌群、耐热大肠菌群和大肠埃希氏菌采用多管发酵法测定。

3 结果与讨论

3.1 雨水水质概况

将收集雨水用作饮用水，首先要分析集水面(路面和屋顶)所收集雨水的水质状况，确定雨水饮用水化需重点关注的指标。本研究以生活饮用水标准检验方法(GB/T 5750-2006)为基准，结合雨水实际径流相关的40余项指标进行分析。表2中列举了代表性的指标测试结果，主要包括感官性状指标、有机物指标、一般化学指标和阴阳离子指标等。由表2可知，未经过集水面直接收集的天然雨水样品水质较好，各项指标均远低于《生活饮用水水源水质标准》(CJ 3020-1993)的一级水源水质指标和《生活饮用水卫生标准》(GB 5749-2006)中的相关限值。但路面和屋顶集水面收集的径流样品中，受到集水面本身及周边环境影响，其感官性状指标(色度和浊度)、有机物指标(总有机碳和石油类)、一般化学指标(pH、氨氮、铝和铅等)均在不同程度上超出《生活饮用水水源水质标准》(CJ 3020-1993)的一级水源水

表2 雨季和旱季常规水质指标测定结果

Table 2 Water quality indexes for road and roof rainwater samples in the rainy and dry seasons

测定项目	雨季		旱季		自然雨水[1)]	CJ 3020-1993(一级)	GB 5749-2006
	路面	屋顶	路面	屋顶			
色度/度	9~275	2~24	2 190~13 100	49~145	2	15	15
浊度/NTU	109~2 842	22~137	195~1 798	1.29~13.36	0.1	3	3
总有机碳/(mg·L^{-1})	2.7~9.3	2.5~8.1	4.5~12.87	4.45~9.49	0.7	无	5
石油类/(mg·L^{-1})	—	—	0.32~0.43	<0.04	<0.04	无	0.3
pH	6.8~9.3	7.6~8.4	7.2~8.4	6.6~7.9	7.6	6.5~8.5	6.5~8.5
氨氮/(mg·L^{-1})	0~0.80	0.01~0.80	0.28~0.92	0.08~0.36	0.25	10	0.5
溶解氧/(mg·L^{-1})	3.7~5.6	4.8~5.3	3.2~7.6	5.4~7.1	6.6	无	无
溶解性总固体/(mg·L^{-1})	16~76	8~79	85~280	104~212	5	1 000	1 000
总硬度/(mg·L^{-1})	5~44	28~59	30~88	14~70	3	350	450
硫酸盐/(mg·L^{-1})	1.5~6.38	1.5~25.1	7.8~45.0	23.2~57.6	1.9	250	250
氯化物/(mg·L^{-1})	1.8~7.9	1.5~7.0	9.0~118.7	28.6~112.5	2.6	250	250
硝酸盐/(mg·L^{-1})	0.8~3.5	0.8~1.0	0.4~5.8	1.9~14.1	0.4	无	20
铍/(mg·L^{-1})	0.001~0.002	0.001~0.002	0	0	0	无	0.002
硼/(mg·L^{-1})	0.010~0.041	0.036~0.063	0.028~0.087	0.051~0.126	0.004	无	0.5
镁/(mg·L^{-1})	0.151~1.381	0.312~0.628	0.412~3.765	0.395~2.52	0.057	无	无
铝/(mg·L^{-1})	0.208~2.788	0.150~0.64	0.144~0.319	0.031~0.178	0.005	无	0.2
钙/(mg·L^{-1})	5.6~19.9	10.0~19.1	15.31~29.7	5.29~22.80	0.816	无	无
铬/(mg·L^{-1})	0.003~0.018	0.003~0.007	0~0.013	0~0.011	0.005	0.05	0.05
铁/(mg·L^{-1})	0.046~0.195	0.044~0.113	0~0.163	0~0.026	0.002	0.3	0.3
锰/(mg·L^{-1})	0.002~0.016	0.002~0.006	0	0	0	0.1	0.1
铜/(mg·L^{-1})	0.002~0.030	0.002~0.005	0.002~0.009	0.002~0.006	0.001	1.0	1.0
锌/(mg·L^{-1})	0.006~0.214	0.006~0.022	0~0.012	0~0.015	0.002	1.0	1.0
砷/(mg·L^{-1})	0~0.001	0~0.002	0.002~0.007	0.003~0.006	0	0.05	0.01
镉/(mg·L^{-1})	0~0.005	0~0.002	0	0	0	0.01	0.005
铅/(mg·L^{-1})	0.001~0.017	0.001~0.002	0~0.001	0~0.002	0.001	0.05	0.01

注：1)自然雨水表示直接接取的天然雨水；“—”表示未测定。

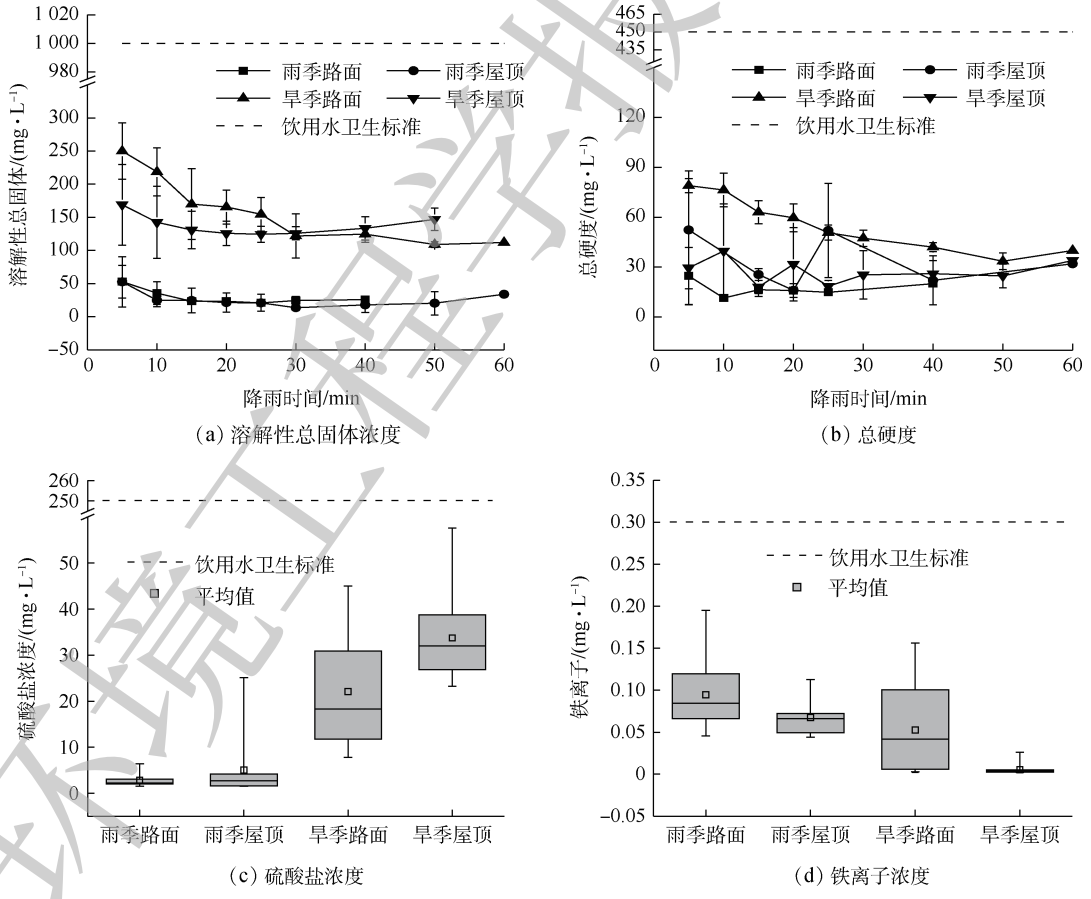
环境工程学报版权所有

质指标和《生活饮用水卫生标准》(GB 5749-2006)中规定限值，而溶解性总固体、总硬度、硫酸盐以及大部分金属和重金属等均未超标。为了更好地实现雨水饮用水化的目标，分别对雨水样品未超标指标和超标指标的历时变化规律进行了探讨，通过重点分析超标指标来解析海南岛雨水径流水质特性，并对雨水饮用水化可行性进行分析。与《生活饮用水水源水质标准》(CJ 3020-1993)相比，《生活饮用水卫生标准》(GB 5749-2006)中水质指标种类更全面。为了便于分析雨水水质，本研究中主要将样品测定指标与《生活饮用水卫生标准》(GB 5749-2006)中相关限值进行比较分析。对于超出《生活饮用水卫生标准》(GB 5749-2006)的指标再与《生活饮用水水源水质标准》(CJ 3020-1993)一级水源水质指标进行比较，全面分析相关水质指标情况。

3.2　未超标水质指标分析

雨季和旱季不同集水面污染物浓度见图1。图1(a)和(b)分别反映了不同条件下雨水样品溶解性固体和总硬度随降雨时间的变化。可以看出，雨季和旱季的路面、屋顶收集的雨水样品中溶解性固体和总硬度均远低于饮用水标准规定的限值。降雨初期，溶解性固体和总硬度均呈现明显降低的趋势，随降雨时间的增加，数值趋于稳定。

在不同季节下，2种集水面收集的雨水样品中阴离子(硫酸盐、氯化物和硝酸盐)浓度均低于饮用水标准(见表2)。以图1(c)硫酸盐为例，对雨季、旱季的路面和屋顶收集雨水样品硫酸盐浓度变化进行分析，发现硫酸盐浓度受季节影响较大，雨季路面和屋顶硫酸盐平均浓度分别为2.82 mg · L^{-1}和5.03



注:在箱线图中,方框为25%~75%分位数值范围,线条为5%~95%分位数值范围,方框内黑线为中位数,下同。

图1　雨季和旱季不同集水面污染物浓度

Fig. 1　Pollutants concentrations of water samples at different catchment areas in rainy and dry seasons

环境工程学报版权所有

mg·L^{-1}，而旱季路面、屋顶硫酸盐浓度的平均值分别是雨季路面、屋顶平均值的7.8倍和6.6倍。

对于金属离子而言，自然雨水及径流样品中金属离子锰、铜、锌等均符合饮用水标准(仅铝和铅等少部分样品超标)，砷、镉等浓度非常低或未检出(见表2)。图1(d)列举了铁离子在不同样品中的浓度分布，雨季路面铁离子浓度均值高于屋顶浓度均值，旱季具有同样的规律且旱季屋顶铁离子浓度较低，与自然雨水基本一致。

3.3 超标水质指标分析

雨水样品中超标的水质指标是雨水饮用水化的关键因素，也是对收集后雨水进行进一步净化时需重点考察的指标。本部分研究内容将对主要的超标指标(色度和浊度、pH和氨氮、铝和铅离子、有机物类及微生物)进行分析，阐明相关指标的降雨历时变化规律，分别对比分析不同季节路面和屋顶收集的雨季水质，为制定合理的雨水饮用水化方案提供数据支持。

3.3.1 色度和浊度

色度和浊度是评价饮用水水质的重要感官指标，可直观反映雨水径流的水质状况。图2(a)是色度在不同季节下路面和屋顶2种集水面的历时变化情况。色度值随降雨历时变化迅速降低，在形成径流20 min时，雨季路面、雨季屋顶、旱季路面和旱季屋顶色度值与初始取样相比，分别降低了75%、53.2%、22.4%和40%。随着降雨时间的延长，色度值变化逐渐趋于平缓。通过对比同一集水面雨水雨季和旱季色度值，发现雨季路面和屋顶雨水的色度值均分别低于旱季路面和屋顶。造成这一现象的主要原因是雨季降雨量大且强度高，与旱季相比，对集水面冲刷能力更强，导致雨季集水面雨水色度下降相对量高于旱季集水面。对比路面和屋顶雨水色度值变化，发现旱季和雨季的路面雨水色度值均高于屋顶。这是因为相比屋顶而言，路面情况往往更为复杂，不仅受落叶和灰尘等杂物影响，还受机动车、非机动车以及行人等复杂交通状况影响[18]，所以造成路面雨水色度值高于屋顶并且超过生活饮用水卫生标准限值。旱季路面尤为突出，降雨量小及复杂环境造成色度值远高于饮用水卫生标准。

图2(b)是雨季和旱季不同集水面雨水样品的浊度随降雨历时变化情况。雨季屋顶和路面、旱季屋顶和路面收集雨水样品的浊度值均随降雨历时变化呈现明显的降低趋势。路面由于受复杂交通状况以及周边绿化带流出的颗粒污染物等因素的影响，导致其雨水浊度值远高于屋顶。雨季路面受降雨冲刷作用强，相比旱季而言，雨水浊度值降低更快，在形成径流20 min时，浊度值变化趋于稳定，与初始(5 min时)样品相比，降低84%。屋顶雨水的浊度值则是旱季低于雨季，这可能与雨季降水频繁导致屋顶潮湿易积水有关。湿热环境下屋顶会有青苔等藻类生物生长，使屋顶水泥表面发生粉化，降雨量较

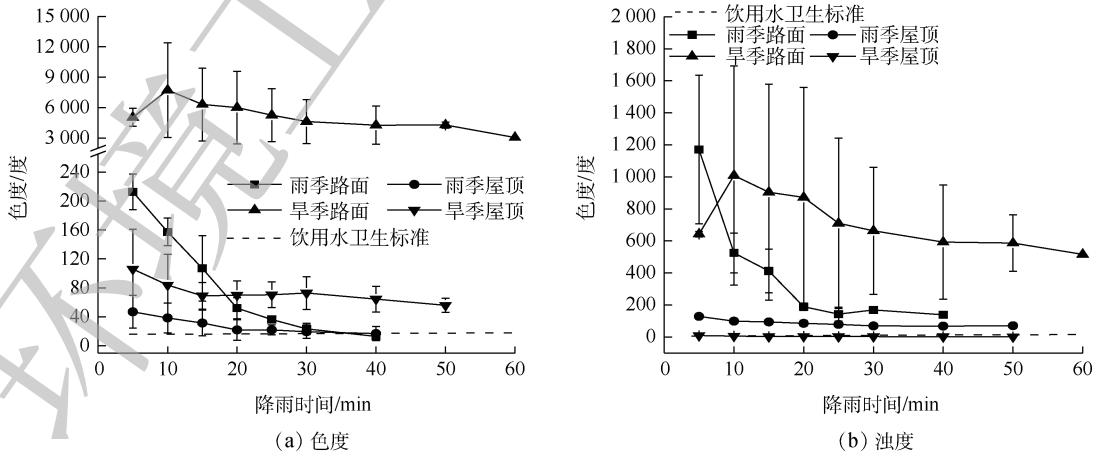


图2 不同条件下收集雨水样品中水质随降雨时间变化

Fig.2 Change in water quality of rainwater samples collected under different conditions with the rainfall duration

大的雨季对表面颗粒物冲刷作用强，使雨季屋顶雨水浊度高于旱季。

通过对不同条件下雨水径流样品的色度和浊度历时变化规律分析发现，色度和浊度随雨水历时变化具有相似的趋势，径流形成初期的样品色度和浊度值均较高且迅速降低，20 min后趋于平稳。因此，适当弃流可大幅提升收集雨水水质，建议收集时对初期雨水进行适当弃流，以保证收集雨水水质。

3.3.2　pH和氨氮

在同一季节，路面雨水pH的平均值略高于屋顶雨水(图3(a))。其中雨季路面雨水的pH最高值可超过饮用水上限值9%，但雨季路面、雨季屋顶、旱季路面、旱季屋顶的pH平均值和中位数均在饮用水标准的限值内，说明雨水的pH良好。在不同季节，不同集水面pH的中位数和平均值接近，表明雨水径流的pH历时变化波动较小。

从图3(b)可以看出，不同季节的屋顶和路面雨水氨氮浓度逐渐降低。在降雨冲刷作用下，雨季路面和屋顶雨水的氨氮浓度最大值均为0.80 mg·L^{-1}，略高于饮用水限值，其余样品中氨氮浓度均低于饮用水标准。旱季路面雨水整体浓度较高(0.28~0.92 mg·L^{-1})，降雨30 min后，氨氮浓度才低于0.5 mg·L^{-1}。这是由于氨氮主要来源于大气干湿沉降和机动车交通损耗[16]，旱季路面降雨冲刷作用小，受机动车影响较大，导致路面氨氮浓度较高。

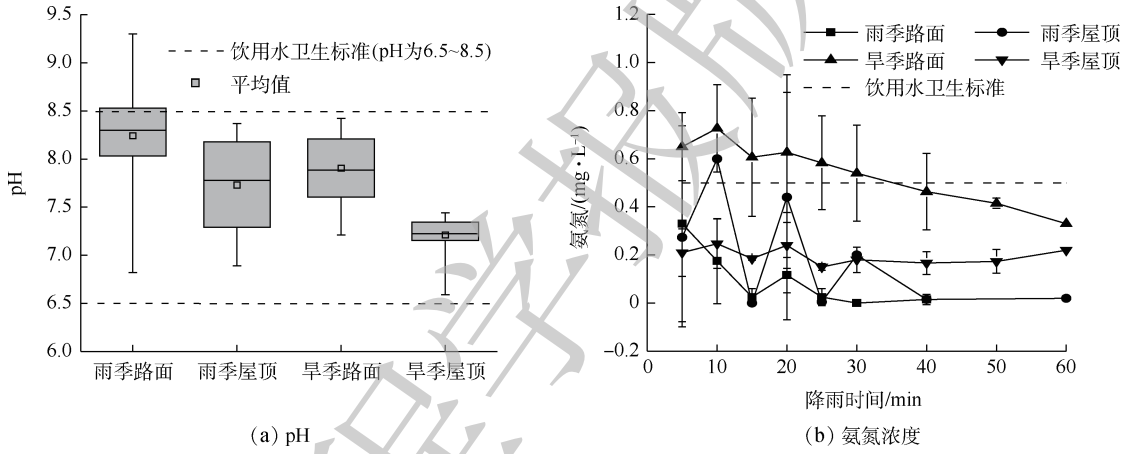


图3　不同条件下收集雨水样品中pH和氨氮浓度随降雨时间变化

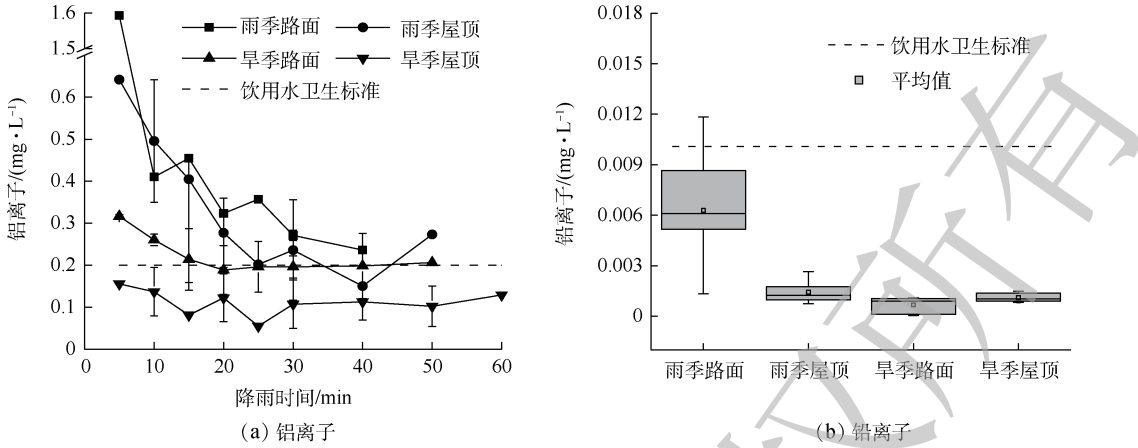
Fig.3　Changes in pH and ammonia nitrogen concentrations in rain water samples collected under different conditions with the rainfall duration

3.3.3　铝和铅离子浓度

自然雨水中的金属离子浓度很低，而雨水径流样品中的金属离子浓度普遍高于自然雨水(表2)，且铝离子浓度明显超出饮用水卫生标准(0.2 mg·L^{-1})，表明金属离子主要受水泥材质集水面影响。雨季不同集水面的雨水样品中铝离子浓度明显高于旱季(图4)，这可能是由于雨季降雨多，对集水面冲刷强度大，使水泥集水面表面铝离子释放量增加。与其他水质指标趋势类似，路面雨水的铝离子浓度均高于屋顶雨水。通过图4(a)中铝离子随降雨历时变化可以发现，随降雨时间的延长，铝离子浓度呈下降趋势，在降雨20~25 min时趋于平稳。

铅离子浓度也具有典型的季节性，雨季浓度略高于旱季。雨季屋顶、旱季路面和屋顶雨水都未超过饮用水卫生标准限值(图4(b))，只有雨季路面径流中的铅离子初始浓度最高值达到0.017 mg·L^{-1}，超出饮用水卫生标准70%，但整体符合《饮用水水源水质标准》(CJ 3020-1993)一级水源水质指标(0.05 mg·L^{-1})。其后，降雨过程持续加长，在径流形成15 min后，铅离子浓度已低于饮用水卫生标准限值(0.01 mg·L^{-1})。

通过以上分析可以发现，对于金属离子超标的铝和铅而言，雨季降水充足时，样品中浓度较高，



(a) 铅离子 (b) 铅离子

图4 不同条件下收集雨水样品铅和铅浓度随降雨时间变化

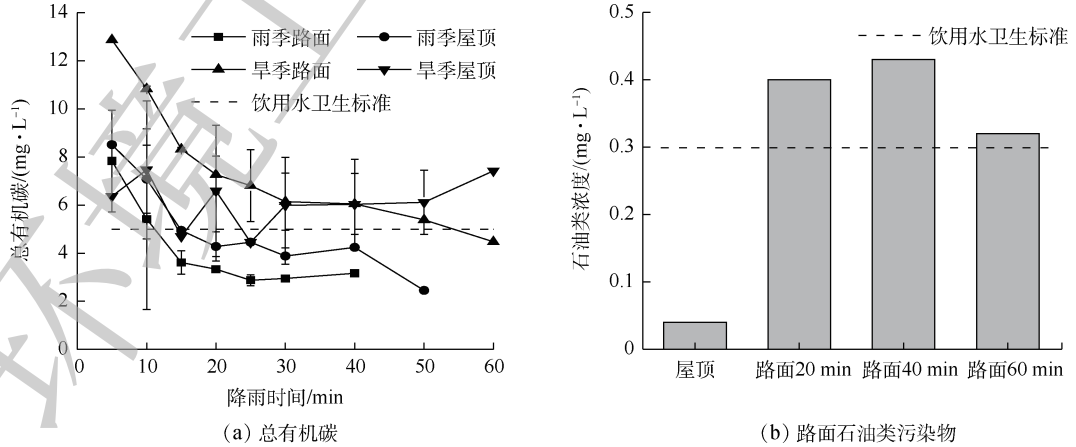
Fig.4 Change in concentration of aluminum and lead in rain water samples collected under different conditions with the rainfall duration

且主要集中在降雨初期收集的样品。因此，可通过弃流的方式有效降低收集雨水中的金属离子浓度，提高不同集水面收集雨水的水质。

3.3.4 *有机物类*

各类集水面均长期暴露于开放环境中，大气沉降、动物及人类活动和腐殖质等均可造成集水面上有机物的积累。在生活饮用水卫生标准中明确规定，总有机碳限值为5 mg·L^{-1}。从图5(a)看出，总有机碳浓度受季节影响较大，雨季收集样品中的总有机碳浓度低于旱季。这主要因为雨季降雨场次间隔小且降雨量大，冲刷作用明显，而旱季降雨频率低且雨量小，导致每场降雨前的有机物积累较多。雨季雨水样品总有机碳浓度在弃流初期15 min降雨后可满足饮用水要求，但旱季雨水样品中有机碳浓度始终高于饮用水标准。

屋顶样品中石油类污染物浓度远低于饮用水标准(0.3 mg·L^{-1})，见图5(b)。与屋顶不同，路面所暴露的环境更为复杂，交通工具燃料泄露和轮胎摩擦等因素[19]均可造成地面环境中石油类有机物的累积。通过对路面雨水石油类污染物浓度历时变化研究发现，不同时间点从路面收集的样品中，石油类污染物浓度均高于饮用水标准，且整个降雨过程中石油类污染物浓度保持在0.32~0.43 mg·L^{-1}(图5(b))。若采用路面集水面收集雨水用作饮用水，则需关注石油类指标，并在后续处理中增加石油类污染物去除



(a) 总有机碳 (b) 路面石油类污染物

图5 不同条件下雨水样品中有机物类指标变化

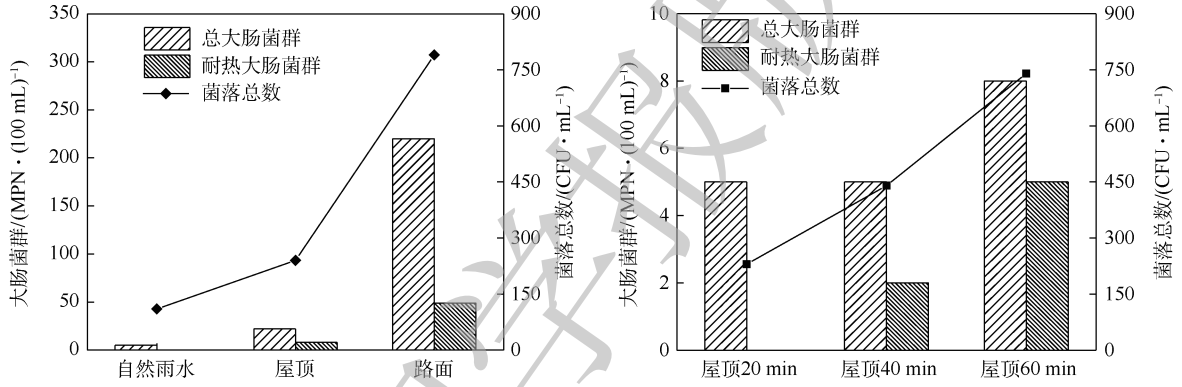
Fig.5 Variation of organic index in rain water samples under different conditions

环境工程学报版权所有

工艺，以确保水质安全。

3.3.5　微生物

在生活饮用水卫生标准中对微生物指标进行了明确规定，总大肠菌群、耐热大肠菌群、大肠埃希氏菌均不得检出，菌落总数小于100 CFU · mL^{-1}。本研究分别针对自然雨水、路面径流和屋顶径流的样品中的微生物指标进行了分析，发现菌落总数均远超饮用水卫生标准(图6)，其中自然雨水菌落总数达到110 CFU · mL^{-1}，路面径流样品中菌落总数最高，达到790 CFU · mL^{-1}，屋顶径流样品达到240 CFU · mL^{-1}。大肠埃希氏菌均未检出，但对于总大肠菌群和耐热大肠菌群，路面样品浓度分别是屋顶样品的10倍和6倍，表明路面雨水样品受微生物污染程度高于屋顶。这些微生物主要来源为人和动物的直接活动等[20-21]，而屋顶受相关因素影响较小，所以微生物浓度较低。在图6(b)中，分别对20、40和60 min屋顶径流样品中微生物指标的历时变化进行分析，发现随着降雨时间的延长，微生物指标均呈现明显上升的趋势。当降雨时间为60 min时，总大肠菌群、耐热大肠菌群和菌落总数分别达到8 MPN · (100 mL)$^{-1}$、5 MPN · (100 mL)$^{-1}$和740 CFU · mL^{-1}。这可能是因为在降雨过程中，地表及空气中湿度逐渐增加，环境条件的改变更有利于微生物生长，从而导致微生物指标随降雨时间呈现增长趋势。以上结果表明，微生物是雨水饮用水化重点关注指标，雨水用作饮用水时需增加相应的消毒措施。



(a) 不同集水面雨水和自然雨水　(b) 屋顶雨水历时变化

图6　微生物菌落数分析

Fig.6　Microbial colony count analysis

3.4　雨水径流饮用水化可行性分析

分析雨季和旱季不同集水面的雨水径流水质发现，自然雨水本身水质较好，雨季由于降雨量大、降雨频率高、冲刷作用强，其径流水质整体好于旱季。与路面相比，屋顶受到环境及人为因素干扰小，径流水质较好。雨水水质优劣状况排序依次为雨季屋顶>旱季屋顶>雨季路面>旱季路面。对于降雨量丰富地区，推荐优先收集雨季屋顶和旱季屋顶雨水；对于屋顶雨水不能满足饮用水需求的地区，可收集雨季路面雨水作为补充，但需加大弃流量，提高收集雨水水质。由于旱季路面雨水水质较差且雨水收集量少，因此不建议收集旱季路面雨水用作饮用水。

结合雨水水质指标随降雨历时变化规律分析，发现超标指标中色度、浊度、金属离子和总有机物等在降雨初期会迅速降低，然后数值趋于稳定。若弃流初期雨水后，超标指标浓度将大幅度降低，大部分指标弃流后可达到或接近饮用水标准。弃流量需根据不同地区屋顶收集雨水水质及降雨量确定，本研究中可根据降雨径流形成时间弃流前15 min径流的雨水来确定。弃去包含大部分污染物的前期径流之后，超标指标主要为色度、浊度、有机物、部分离子及微生物，可采用吸附和过滤等工艺进一步净化水质。考虑到雨水中微生物指标超过饮用水卫生标准，雨水用作饮用水前需进行消毒处理，可以通过紫外消毒、负载纳米银等工艺进行处理，充分保证饮用水水质安全。目前，本研究已在斯里兰卡

开展雨水饮用水化工作，屋顶收集雨水经弃流、过滤和消毒工艺处理后符合中国和斯里兰卡生活饮用水卫生标准，净化后的雨水可供当地居民饮用。

综上所述，在降雨量丰富的地区收集雨水用作饮用水是可行的。结合当地降雨情况和集水面性质，采取合理的弃流和净化工艺，可实现雨水饮用水化。

4 结论

1) 在岛屿环境中，屋顶和水泥路面雨水径流中超过饮用水标准的水质指标主要包括色度、浊度、pH、氨氮、总有机碳、铝离子、铅离子、石油类和微生物等，是雨水饮用水化过程中需重点关注的指标。

2) 屋顶和水泥路面雨季和旱季雨水径流水质分析结果表明，雨季雨水水质好于旱季，这主要是由于雨季降雨强度大，冲刷作用好；不同集水面雨水径流水质分析结果表明，屋顶水质好于路面，主要是因为路面的人为活动多、交通状况复杂，而屋顶受周围环境干扰相对较小。

3) 通过对雨水水质随降雨历时变化规律分析发现，径流形成初期，雨水水质较差，污染物浓度高，合理弃流后可大幅改善水质，大大降低污染物浓度。

4) 实现雨水径流饮用水化虽然面临一定程度的风险，但是经过弃流、过滤与消毒等工艺相结合可充分降低风险，进而实现雨水径流饮用水化。研究结果可为雨水资源丰富的岛屿地区及“一带一路”沿线国家利用雨水解决饮用水危机提供经验和借鉴。

参 考 文 献

[1] VOROSMARTY C J, MCINTYRE P B, GESSNER M O, et al. Global threats to human water security and river biodiversity [J]. Nature, 2010, 467(7315): 555-561.

[2] 刘继平. 关于我国水危机的成因分析与对策建议[J]. 环境工程, 2008, 26(4): 97-99.

[3] 张昕璇. 我国饮用水安全问题现状及保障对策分析[J]. 环境与发展, 2017, 29(10): 221-223.

[4] 张建平, 邹士洋, 伍俊荣, 等. 西沙群岛雨水净化及水质特征分析[J]. 海军医学杂志, 2013, 34(2): 55-57.

[5] 林庆棋, 伍俊荣, 苑同业, 等. 西沙岛屿收集的雨水水质调查报告与卫生学评价[J]. 海军医学, 1998 (2): 162-163.

[6] SMITH A H, LINGAS E O, RAHMAN M, et al. Contamination of drinking-water by arsenic in Bangladesh: A public health emergency[J]. Bulletin of the World Health Organization, 2000, 78(9): 1093-1103.

[7] YOUNG S M, PITAWALA A, GUNATILAKE J, et al. Fate of phosphate and nitrate in waters of an intensive agricultural area in the dry zone of Sri Lanka[J]. Paddy and Water Environment, 2010, 8(1): 71-79.

[8] WANG Z Y, LIU C M. Study on rainwater reuse system[J]. Advanced Materials Research, 2013, 807: 1413-1416.

[9] RUBASINGHE R, GUNATILAKE S K, CHANDRAJITH R, et al. Geochemical characteristics of groundwater in different climatic zones of Sri Lanka[J]. Environmental Earth Sciences, 2015, 74(4): 3067-3076.

[10] SHAHID S. Rainfall variability and the trends of wet and dry periods in Bangladesh[J]. International Journal of Climatology, 2010, 30(15): 2299-2313.

[11] 张黎明, 魏志远, 漆智平, 等. 近30年海南不同地区降雨量和蒸发量分布特征研究[J]. 中国农学通报, 2006, 22(4): 403-407.

[12] LEE J Y, YANG J, HAN M, et al. Comparison of the microbiological and chemical characterization of harvested rainwater and reservoir water as alternative water resources[J]. Science of the Total Environment, 2010, 408(4): 896-905.

[13] MENDEZ C B, KLENZENDORF J B, AFSHAR B R, et al. The effect of roofing material on the quality of harvested rainwater [J]. Water Research, 2011, 45(5): 2049-2059.

[14] GIKAS G D, TSIHRINTZIS V A. Assessment of water quality of first-flush roof runoff and harvested rainwater[J]. Journal of Hydrology, 2012, 466: 115-126.

环境工程学报版权所有

[15] SAZAKLI E, ALEXOPOULOS A, LEOTSINIDIS M, et al. Rainwater harvesting, quality assessment and utilization in Kefalonia Island, Greece[J]. Water Research, 2007, 41(9): 2039-2047.

[16] 张千千, 王效科, 郝丽岭, 等. 重庆市路面降雨径流特征及污染源解析[J]. 环境科学, 2012, 33(1): 76-82.

[17] 李畅, 涂晓杰, 秦雅琪, 等. 南宁市道路初期雨水径流污染物浓度分析[J]. 环境工程, 2017, 35(7): 70-75.

[18] 冯伟, 王建龙, 车伍, 等. 不同地表雨水径流冲刷特性分析[J]. 环境工程学报, 2012, 6(3): 817-822.

[19] 鲁雄飞. 城市主干道初期雨水污染特征研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2013.

[20] 王建军, 李田, 侯娟, 等. 路面径流的大肠菌群污染及其雨水花园处理[J]. 环境工程学报, 2014, 8(12): 5221-5225.

[21] CHOW M F, YUSOP Z, TORIMAN M E, et al. Level and transport pattern of faecal coliform bacteria from tropical urban catchments[J]. Water Science and Technology, 2013, 67(8): 1822-1831.

(本文编辑:郑晓梅,张利田)

Water quality characteristic of rainfall runoff on the cement roof and cement road in the island environment and its feasibility as the drinking water resource

YAO Guoqing[1,2], MENG Ying[1], ZHANG Bo[1], LI Yuan[1], HU Minhuo[1,3], LIU Wenbin[1,4], ZHAO Ziwang[1,4], LIU Tian[1,5], HU Zhen[2], LUAN Fubo[1,4,*]

1. Key Laboratory of Drinking Water Science and Technology, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China
2. School of Environmental Science and Engineering, Shandong University, Qingdao 266237, China
3. School of Architectural and Surveying & Mapping Engineering, Jiangxi University of Science and Technology, Ganzhou 341000, China
4. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China
5. State Key Laboratory of Chemo/Biosensing and Chemometrics, Hunan University, Changsha 410082, China
* Corresponding author, E-mail: fbluan@rcees.ac.cn

Abstract Rainwater harvesting offers an considerable potential as an alternative drinking water supply in the island environment. In this study, the changes in the water quality of rainfall runoff collected from roof and road were analyzed in the rainy season and the dry season, and its feasibility as the drinking water resource was also evaluated. Results showed that due to heavy and concentrated rainfall in rainy season, its water quality was significantly better than that in the dry season. Due to slight environmental and human disturbance for the roof-runoff, its water quality of was better than that of the road-runoff. The order of rainwater harvesting was recommended as roof-runoff in rainy season > roof-runoff in dry season > road-runoff in rainy season, and road-runoff in the dry season was not recommended due to its poor water quality. The water quality indexes beyond the standards for drinking water were color, turbidity, metal ions, ammonia nitrogen, organic compounds and microbiological contaminants, which presented a rapid decrease trend along the early rainfall duration, and then gradually reached stable. Therefore, the water quality could be greatly improved by discarding the initial rainwater. Then the remained rainwater could be collected and treated by filtration and disinfection to meet the standards for drinking water. On the basis of rainfall conditions and qualities of catchment area, the reasonable discarding scheme and the following filtration and disinfection could realize the yield of potable water from rainfall. These results provide a theoretical basis for the effective utilization of rainwater in the rich rainfall islands and countries along " Belt and Road".

Keywords roof-runoff; road-runoff; water quality characteristic; drinking water; island environment

环境工程学报版权所有