

# 山地校园不同下垫面雨水径流重金属污染特征和健康风险评估

董莉莉, 曹必成, 赵瑞一

(重庆交通大学 建筑与城市规划学院, 重庆 400074)

**摘要:** [目的] 了解山地校园不同下垫面雨水径流重金属污染特征及雨水径流中重金属元素对于人体的健康风险, 为山地海绵城市建设提供径流污染控制参考和人员健康保护基础数据。[方法] 2019年7月22日在重庆交通大学针对屋顶、道路、停车场和广场4种典型的下垫面进行了雨水径流的取样监测, 并统计分析场次降雨平均浓度(EMC)、电导率(EC)、钠吸附率(SAR)、危险商(HQ)和危险指数(HI)。[结果] 广场径流过程中重金属元素整体变化波动较大, 道路雨水径流的重金属健康风险最大而屋顶健康风险最小; 大多重金属污染物在产流后的10 min内出现了降幅, 其中Fe和Mn的降幅较大, Zn的降幅中等, Cu的降幅最低; As和Cr是雨水径流中健康风险最高的重金属污染物。[结论] 山地校园重金属污染物冲刷速度较快, 人流大的下垫面雨水径流中重金属元素变化波动较大, 但健康风险较低; 车流大的下垫面雨水径流中重金属元素波动较为稳定, 但健康风险较高。

**关键词:** 山地校园; 下垫面; 降雨径流; 重金属; 健康风险评估; 海绵城市

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2020)05-0088-09

中图分类号: X832

**文献参数:** 董莉莉, 曹必成, 赵瑞一. 山地校园不同下垫面雨水径流重金属污染特征和健康风险评估[J]. 水土保持通报, 2020, 40(5): 88-96. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2020.05.014; Dong Lili, Cao Bicheng, Zhao Ruiyi. Heavy metal pollution characteristics and health risk assessment of rainwater runoff on different underlying surfaces of mountainous campus [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2020, 40(5): 88-96.

## Heavy Metal Pollution Characteristics and Health Risk Assessment of Rainwater Runoff on Different Underlying Surfaces of Mountainous Campus

Dong Lili, Cao Bicheng, Zhao Ruiyi

(College of Architecture and Urban Planning, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China)

**Abstract:** [Objective] A study was conducted to understand the heavy metal pollution characteristics of rainwater runoff on different underlying surfaces and the health risks of heavy metal elements in rainwater runoff for the human body. The goal was to provide reference for runoff pollution control in the construction of a sponge city in a mountainous region and provide basic data for human health protection. [Methods] The rainwater runoff of four typical underlying surfaces for a roof, road, parking lot, and square was sampled and monitored at Chongqing Jiaotong University on July 22, 2019. The even mean concentrations, electric conductivity, sodium adsorption rate, hazard quotient, and hazard index were statistically analyzed. [Results] The overall change of heavy metal elements fluctuates greatly during the square runoff process. The health risk of heavy metals in rainwater runoff on roads was the largest, and that of runoff on roofs was the smallest. The large amount of multiple metal pollutants showed a decrease in 10 min after the runoff. The decreases in Fe and Mn were the largest, the decrease in Zn was moderate, and the decrease in Cu was the lowest. As and Cr were the heavy metal pollutants with the highest health risks in rainwater runoff.

收稿日期: 2020-05-29

修回日期: 2020-07-03

资助项目: 住房和城乡建设部科学技术计划项目“基于CGB集成的既有校园绿色改造适宜性技术研究与应用”(2017-K1-022); 重庆市社会科学规划项目“基于自下而上视角的重庆城市生态品质提升评价研究”(2019YBSH085); 重庆市研究生科研创新项目(CYS20295)

第一作者: 董莉莉(1974—), 女(汉族), 河南省信阳市人, 教授, 主要从事海绵城市研究。Email: 12798062@qq.com.

通讯作者: 赵瑞一(1987—), 男(汉族), 河北省唐山市人, 博士, 主要从事环境变化与地质生态研究。Email: swu506@163.com.

[Conclusion] Heavy metal pollutants scour faster in a mountainous campus. The heavy metal elements in rainwater runoff of the underlying surfaces with a large human flow fluctuate greatly, but the health risk is low. Heavy metal elements in rainwater runoff of the underlying surfaces with heavy traffic flow have more-stable fluctuations, but they have higher health risks.

**Keywords:** mountainous campus; underlying surface; rainwater runoff; heavy metal; health risk assessment; sponge city

随着中国城镇化进程的不断推进,大量的绿地被建设用地所取代。城市用地中自然水循环遭到破坏,下渗水转为污染严重的地表径流,冲击着城市受纳水体<sup>[1-2]</sup>。面对严峻的城市水环境,以自然渗透、自然净化为目标的海绵城市理念得到了国家的重视和大规模的推广<sup>[3-4]</sup>。径流污染控制是海绵城市建设的核心目标。当前,径流中各类重金属的潜在危害性已引起了一些学者的关注<sup>[5-6]</sup>。重金属原义是指密度大于 $4.5\text{ g/cm}^3$ 的金属,但从环境污染方面所指的重金属主要是汞(水银)、镉、铅、铬及类金属砷等生物毒性显著的重元素。重金属具有污染持久、区域广泛、治理困难等特点<sup>[7]</sup>。其与悬浮固体和有机污染物等不同,在环境体系中难以降解,且易通过水和食物链等途径在人体内富集,达到一定含量后会对人体产生毒害作用。如果不加以控制将其直接排入受纳环境,易引起环境体系的恶化,最终影响人的生命安全。重庆作为典型的山地城市具有起伏路段多,径流过程中有明显的冲刷作用强、峰值形成时间短等特点<sup>[8]</sup>,雨水径流对城市水环境的影响尤为突出,山地校园存在着山地城市典型的几种下垫面。因此,在重庆市校园开展雨水径流重金属污染特征研究并对雨水径流中的重金属进行健康风险评估具有重要意义。

本次研究选取了重庆交通大学屋顶、道路、停车场和广场4种典型的下垫面,针对径流中As,Cd,Cr,Cu,Fe,Mn,Pb,Zn这8种重金属元素的变化规律进行监测,并通过统计分析对不同下垫面和不同重金属污染物的变化特征进行探究,对雨水径流中的重金属进行健康风险评估,以期对重庆山地海绵城市建设中城市径流污染控制提供数据积累及参考依据。

## 1 研究区概况

重庆地处中国内陆西南区域四川盆地( $28^{\circ}10' - 32^{\circ}13' \text{ N}, 105^{\circ}17' - 110^{\circ}11' \text{ E}$ ),位于长江和嘉陵江交汇处,其独特的地理区位使重庆市拥有独特的气候条件,属亚热带季风性气候,降雨主要集中在夏秋季节,夏季占年降水量45%左右,冬季约占5%,春、秋季各占约25%,全年降水量平均1200 mm左右。本次研究区域位于重庆市的南岸区。2019年7月22日,在历时57 min降雨期间,对屋顶、道路、停车场和广场

4种不同用地类型下的径流水质进行了监测。广场取样点位于重庆交通大学图书馆前,汇水面积约 $1\ 200\text{ m}^2$ ,坡度约3%,由于广场为学生上下课的必经之处人流量大,采样处位于广场雨水口。停车场取样点位于地上和地下停车场的交汇处,地下停车场出入口为双向2车道,地上汇水面积约 $800\text{ m}^2$ ,坡度约5%,采样处位于交汇处雨水口。屋顶取样点位于重庆交通大学学工楼,混凝土屋面,汇水面积约 $200\text{ m}^2$ ,采样处位于雨水立管。道路取样点位于学府大道二塘轻轨站下,路面材料为沥青,坡度约5%,单向3车道,汇水面积约 $500\text{ m}^2$ ,清扫频率为1次/d,采样处位于道路旁雨水口。

## 2 材料与方法

### 2.1 样品采集与测定

在各监测点现场采用德国WTW公司生产的Multi350 i对水温、pH值、电导率(EC)、溶解氧(DO)进行测定,其精度分别为 $0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ , $1\text{ }\mu\text{S/cm}$ , $0.01$ 和 $\pm 0.5\%$ 。同时,采集水样以测试各用地类型雨水径流中的重金属浓度。在降雨期间,自产流起30 min内,每隔5 min采1个样;30~60 min时段内,每隔10 min采1个样;之后每隔30 min采1个样,直至径流结束。因地势原因,广场、停车场径流时间短,各采取了7个样品,屋顶和道路径流时间较长,采取了9个样品。用50 ml聚乙烯塑料瓶采集水样,并通过 $0.45\text{ }\mu\text{m}$ 滤纸进行过滤,加入1:1优级纯硝酸酸化至 $\text{pH} < 2$ ,以防止阳离子附着在瓶壁上,用赛默飞iCAP<sup>TM</sup>7 200 ICP-OES等离子体光谱仪测试阳离子浓度,测试工作在长江科学院重庆分院完成。

### 2.2 数据分析方法

2.2.1 场次降雨平均浓度 由于雨水径流采样监测难以做到连续不间断,并且污染物浓度随降雨过程变化差异很大目前通常采用场次降雨径流的平均浓度(EMC)对径流污染程度进行评估。以径流量为权重求得一次降雨径流重金属平均浓度,即以降雨事件总污染负荷与总径流体积比值来表征径流污染<sup>[9]</sup>。计算公式用下式表示:

$$\text{EMC} = \frac{M}{V} = \frac{\int_0^T C_i Q_i dt}{\int_0^T Q_i dt} \approx \frac{\sum C_i Q_i \Delta t}{\sum Q_i \Delta t} \quad (1)$$

式中:  $t$  为总径流时间(min);  $C_i$  为间隔时间段污染物浓度(mg/L);  $Q_i$  为间隔时间段径流量(L/min);  $\Delta t$  为间隔时间(min)。

受试验设备等客观条件限制,本次研究未能实测径流量。由于研究下垫面材质为地砖广场、混凝土屋面和停车场、沥青道路,在降雨时段内渗量和蒸发量很少,可以忽略不计。同时在采样时记录了降雨开始和径流形成时间(5 min),进而消除了降雨和径流之间的滞后性。因此计算中在扣除产流时间后,以降雨量权重代替了径流量所占的权重<sup>[10]</sup>。

根据重庆市城乡建设委员会 2017 年 8 月 23 日发布的《重庆市暴雨强度修订公式与设计暴雨雨型》(渝建[2017] 443 号),研究区域应采用 I 区设计暴雨雨型,其 1 h 设计暴雨过程降雨量权重见图 1。

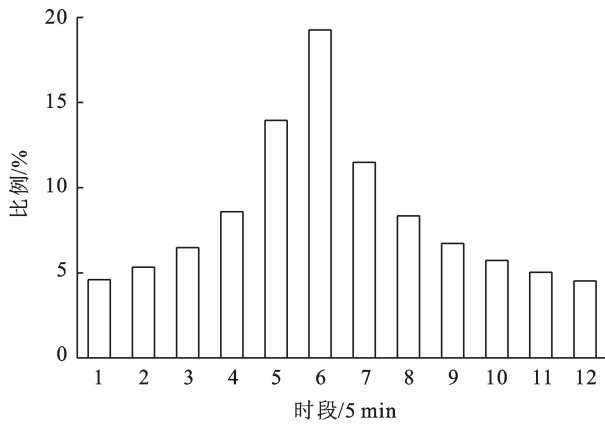


图 1 研究区 1 h 设计暴雨过程

2.2.2 盐度和碱度 径流雨水是否适合作为灌溉水回用供给绿地取决于水中盐度和碱度对土壤的影响。

采用电导率(EC)作为径流雨水回用作为供给绿地的盐度危害的评价指标。盐度的危害分为 4 类:  $C_1$  (低,  $EC < 250 \mu\text{S}/\text{cm}$ ),  $C_2$  (中等,  $250 < EC < 750 \mu\text{S}/\text{cm}$ ),  $C_3$  (高,  $750 < EC < 2\ 250 \mu\text{S}/\text{cm}$ ) 和  $C_4$  (非常高,  $EC > 2\ 250 \mu\text{S}/\text{cm}$ )。

采用钠吸附率(SAR)作为径流雨水回用作为供给绿地的碱度危害评价指标,其计算公式如下:

$$\text{SAR} = \text{Na}/(\text{Ca} + \text{Mg})^{0.5} \quad (2)$$

钠(碱度)危害分为 4 类:  $S_1$  (低,  $\text{SAR} < 10$ ),  $S_2$  (中,  $10 < \text{SAR} < 18$ ),  $S_3$  (高,  $18 < \text{SAR} < 26$ ) 和  $S_4$  (很高,  $\text{SAR} > 26$ )。

盐度和碱度原始参数、公式来自于美国盐度实验室(USSL)给出的范围和相关研究<sup>[11]</sup>。

2.2.3 危险商和危险指数 危险商(HQ)和危险指数(HI)旨在评估水中微量元素引起的毒性。毒性常分为基因毒性和躯体毒性,对应着人体健康的致癌性

风险和非致癌性风险,危险商(HQ)和危险指数(HI)评估的是对人体健康影响的潜在非致癌性风险<sup>[12]</sup>。

两种主要途径:通过口或鼻摄入和通过裸露的皮肤吸收,可能使人接触到雨水径流,由下式可确定两种主要途径个体每日所接受的剂量(average daily dose):

$$\text{ADD}_{\text{ingestion}} = \frac{C_w \times \text{IR} \times \text{ABS}_g \times \text{EF} \times \text{ED}}{\text{BW} \times \text{AT}} \quad (3)$$

$$\text{ADD}_{\text{dermal}} = \frac{C_w \times \text{SA} \times K_p \times \text{EF} \times \text{ET} \times \text{ED}}{\text{BW} \times \text{AT}} \quad (4)$$

式中:  $C_w$  为各下垫面重金属元素 EMC 浓度; IR 为摄食率(L/d); EF 为曝光频率(a/d); SA 为裸露的皮肤区域( $\text{cm}^2$ ); ET 为暴露的时间(h/d); ED 为暴露持续时间(a); BW 为体重(kg); AT 为非致癌物质的平均时间(d);  $\text{ABS}_g$  为肠胃道吸收因子,在这项研究中; As 为 95%; Cd 为 5.0%; Cr 为 3.8%; Cu 为 57%; Fe 为 1.4%; Mn 为 6.0%; Pb 为 11.7%; Zn 为 20%;  $K_p$  是样品中的皮肤渗透系数( $\text{cm}/\text{h}$ ),铅为 0.001,砷、镉、锰、铁、铜、铅为 0.001,铬为 0.003, Zn 为 0.000 6。各项参数分为成人和儿童两个评级(见表 1)。

表 1 研究区重金属个体每日接受剂量 ADD 计算参数

参数名称	成人	儿童
IR/( $\text{L} \cdot \text{d}^{-1}$ )	2.0	0.64
EF/( $\text{a} \cdot \text{d}^{-1}$ )	350	350
SA/ $\text{cm}^2$	18000	6600
ET/( $\text{h} \cdot \text{d}^{-1}$ )	0.58	1.0
ED/a	70	6
BW/kg	65	20
AT/d	2550	2190

注:IR 为摄食率; EF 为曝光频率; SA 为裸露的皮肤区域; ET 为暴露的时间; ED 为暴露持续时间; BW 为体重; AT 为非致癌物质的平均时间。

危险商(HQ)反映了单一途径的非致癌风险。通过将每种途径(通过口或鼻摄入和通过裸露的皮肤吸收)个体所接受的剂量与相应的参考剂量(RfD)进行比较来估算。如果比值  $> 1$ ,则该项途径接触雨水径流具有潜在的非致癌性风险。

$$\text{HQ} = \text{ADD}/\text{RfD} \quad (5)$$

式中: RfD 为参考浓度,  $\text{RfD}_{\text{dermal}} = \text{RfD} \times \text{ABS}_g$  各重金属元素参考浓度数值见表 2。

危险指数(HI)反映的是以上两种途径引起的总潜在非致癌性风险。通过计算两种途径下的危险商(HQ)的总和来进行评估,若总和  $> 1$ ,则认为径流雨

水所含的躯体毒性物质对人体健康有潜在的不利影响。所有原始参数数据均来自美国环保局(USEPA)和相关研究<sup>[13]</sup>。

表 2 试验参考浓度数值(RfD)

元素	RfD <sub>ing</sub> /( $\mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ )	RfD <sub>der</sub> /( $\mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ )
As	0.3	0.285
Cd	0.5	0.025
Cr	3	0.075
Cu	40	12
Fe	700	140
Mn	24	0.96
Pb	1.4	0.42
Zn	300	60

$$HI = \sum(HQ_{ing} + HQ_{derm}) \quad (6)$$

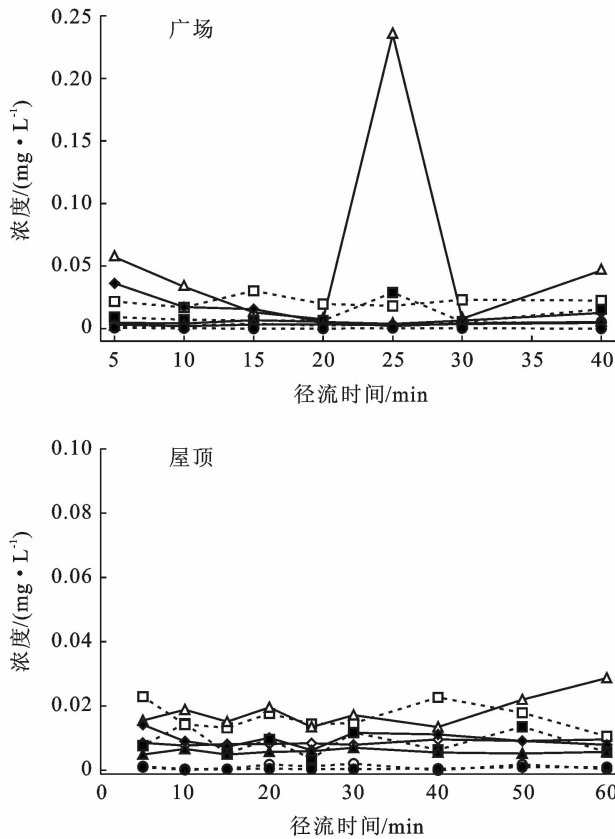


图 2 研究区不同下垫面重金属浓度历时分布

屋顶雨水径流中的重金属元素变化较为稳定,可能是因为屋面材料为混凝土,重金属污染的来源大多为大气沉降,而取样前期晴天数较短,污染物积累量少,没有出现较大变化的情况<sup>[14]</sup>。

道路雨水径流是学者们研究的热点话题,许多专家学者对此进行了研究<sup>[15-16]</sup>,他们大多数认为重金属浓度随降雨径流过程呈锯齿状变化,并把原因归于重金属元素主要来自于轮胎摩擦、制动器和燃料等。但

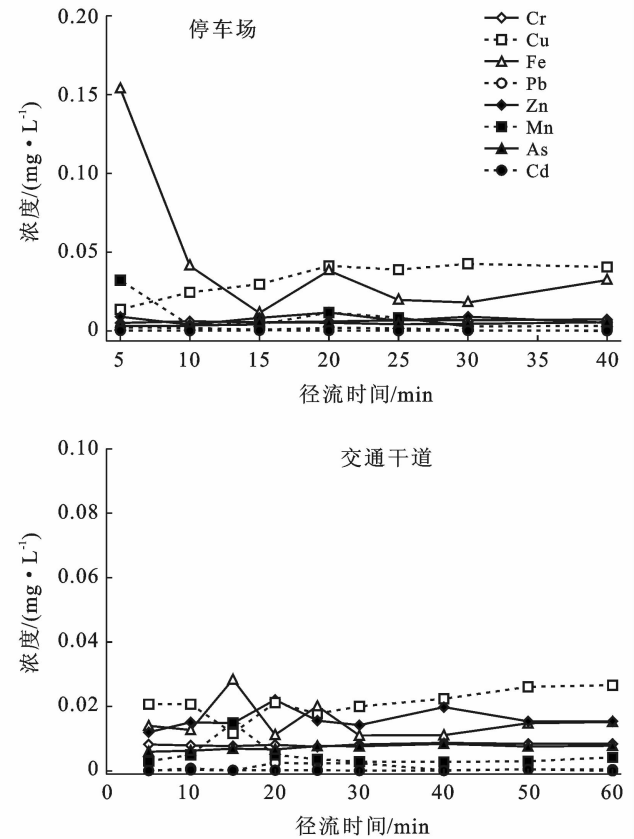
式中: $HQ_{ing}$ 为通过口鼻摄入引起的危险商; $HQ_{derm}$ 为通过皮肤吸收引起的危险商。

### 3 结果与分析

#### 3.1 不同下垫面径流污染特征

图 2 为 4 种下垫面降雨径流中 8 种重金属元素的历时分布特征。广场的重金属浓度表现为 Fe, Zn, Cu, Mn 的浓度大于其他元素,其中 Fe, Mn 的变化范围高达 31.78, 9.52 倍。Fe 和 Mn 的变化有较高的相似性,呈“W”型,其他元素有着相似的变化趋势,但变化趋势不如 Fe, Mn 明显。相同的变化特征说明其具有相同来源,因此 Fe 和 Mn 较高的变化范围可能是周边中的土壤混入造成的。

停车场的重金属浓度仅有 Fe 和 Mn 元素在初期出现了较大的降幅,其余重金属元素变化较为稳定。



是本研究的研究结果并未显示这一点,整体呈稳定趋势。根据 Helmreich 的研究<sup>[17]</sup>,雨季(5 月到 9 月)的重金属元素浓度对比旱季(11 月到次年 3 月)有着明显的下降趋势,可能是因为取样季节位于雨季,地面较为干净,所以表现的并不明显。

#### 3.2 不同重金属径流污染特征

8 种重金属元素在 4 种下垫面的时间变化特征见图 3。

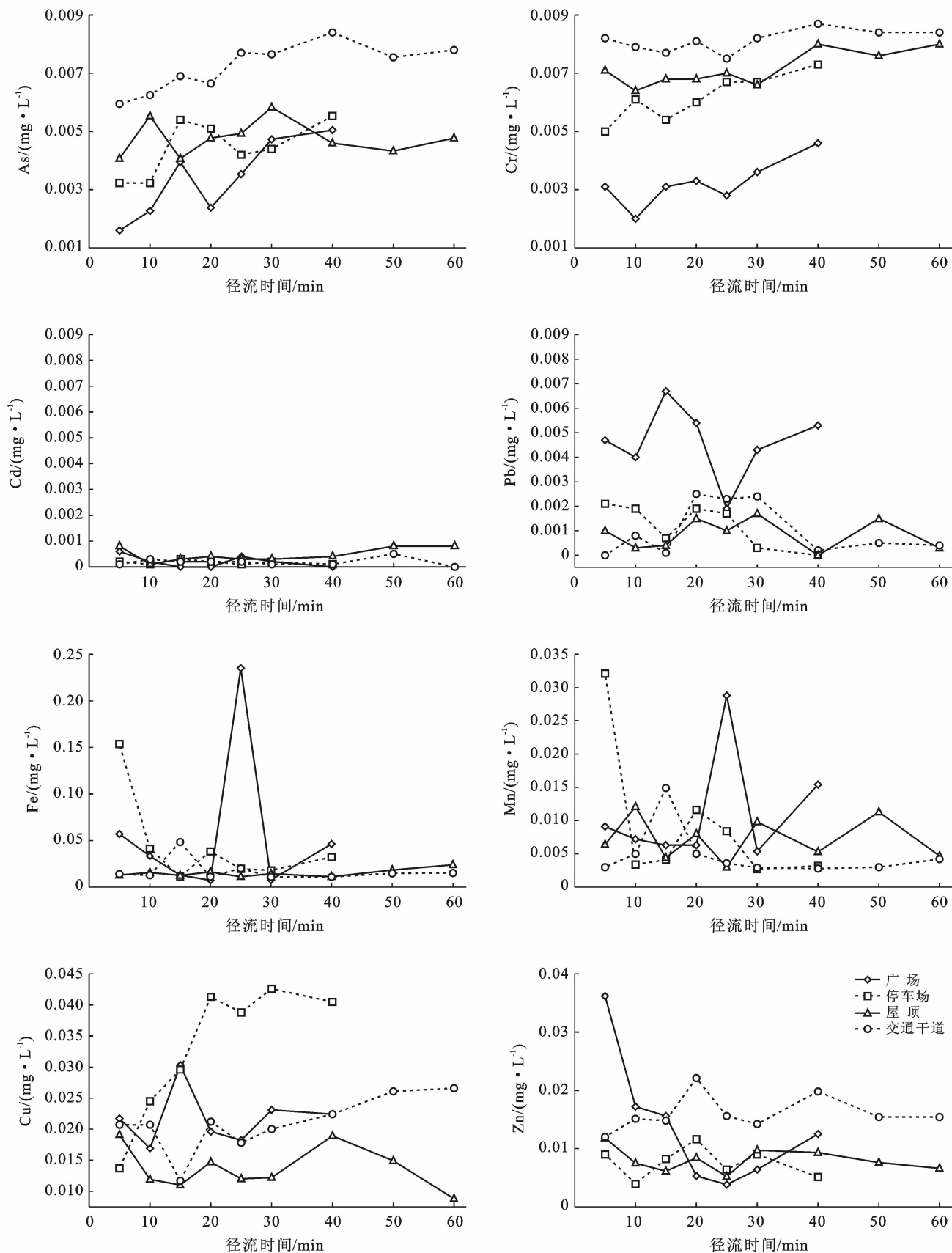


图 3 研究区不同重金属浓度历时分布

道路径流中 As 和 Cr 浓度始终大于屋顶、停车场、广场,并在初期径流出现了明显的梯度,浓度大小

为道路>屋顶>停车场>广场;Cd 在径流的全过程中浓度均处于  $0.001 \text{ mg/L}$  以下,并且在广场、停车

场、屋顶、道路 4 种下垫面下变化较稳定;Pb 在广场的平均浓度高于其他 3 种下垫面,4 种下垫面的 Pb 在产流开始后的 25 min 都出现了一个拐点,分析认为产流开始后的 25 min 可能是径流量最大的时刻,在径流初期,降雨以冲刷为主,而随着降雨历时增加,径流量加大,稀释作用转为主导<sup>[18]</sup>;停车场 Fe 和 Mn 在初期径流的浓度分别为 0.153 7 mg/L 和 0.032 1 mg/L,径流产生 10 min 后,降到了 0.041 3 mg/L 和 0.003 4 mg/L 降幅达 79.12% 和 89.41%,初期的冲刷效应较明显。而广场、屋顶和道路的并无明显的此效应,但广场在产流后的 25 min,Fe、Mn 均出现了激增然后骤降的现象。由上文关于下垫面径流污染的特征的分析,广场 Fe、Mn 激增可能是周边中的土壤混入造成的;Cu 在停车场从径流开始一直在增长,表

现出了较强的冲刷现象,在产流后 25 min 开始下降,降幅为 6%,之后趋于稳定且高于其余 3 种用地类型。广场、屋顶、道路的 Cu 在径流开始后 10 min 便开始下降,降幅分别为 10%,38%,3%;Zn 在广场、停车场、屋顶的径流初期的浓度分别为 0.036 mg/L,0.009 mg/L 和 0.012 mg/L,产流 10 min 后,降到了 0.017 mg/L,0.004 mg/L 和 0.008 mg/L,降幅为 52.8%,55.6% 和 33.3%。道路的 Zn 则起伏波动变化,这与张千千等<sup>[19]</sup>的研究一致。

### 3.3 场次降雨平均浓度

为了对不同下垫面雨水径流重金属进行健康性评估,需要计算场次降雨平均浓度(EMC)来表示降雨的地表径流全过程排放重金属污染物的平均浓度,计算结果见表 3。

表 3 研究区不同下垫面场次降雨重金属平均浓度(EMC)

下垫面类型	As	Cd	Cr	Cu	Fe	Mn	Pb	Zn	K	Ca	Na	Mg
广场	0.0036	0.00015	0.0034	0.0218	0.0558	0.0117	0.0047	0.0137	7.37	23.14	11.19	0.97
停车场	0.0046	0.00016	0.0063	0.0339	0.0434	0.0086	0.0011	0.0073	12.76	30.09	10.57	0.92
屋顶	0.0047	0.00052	0.0073	0.0138	0.0158	0.0072	0.0008	0.0080	4.45	15.24	12.02	1.22
道路	0.0074	0.00019	0.0082	0.0219	0.0150	0.0045	0.0009	0.0163	6.94	24.48	8.92	0.99

### 3.4 健康风险评估

3.4.1 作为绿地灌溉水回用风险评估 盐可能会通过改变渗透过程来限制水分的吸收,或者通过有毒成分所引起的代谢反应来限制植物对水分的吸收,从而从物理上损害植物的生长<sup>[20]</sup>。盐分对土壤的影响导致土壤结构,渗透性和通气性的变化,从而间接影响

植物的生长。而较高的钠(碱度)含量会引起絮凝作用,并破坏土壤的自然倾斜角和土壤的渗透性<sup>[11]</sup>。

采用德国 WTW 公司生产的 Multi350 i 测定的不同下垫面径流雨水电导率(EC)见表 4。由表 4 可知,广场、停车场、屋顶、道路的径流雨水盐度均处于  $EC < 250 \mu S/cm$  范围内,属于 C1 低级危害。

表 4 研究区山地校园不同下垫面径流雨水电导率(EC)

下垫面类型	5 min	10 min	15 min	20 min	25 min	30 min	40 min	50 min	60 min	平均值
广场	101.9	97.9	83.2	97.0	119.6	130.6	144.3			110.64
停车场	99.4	77.8	117.5	123.6	128.7	121.0	127.7			113.67
屋顶	62.7	48.1	36.5	29.1	32.7	34.7	40.5	66.5	75.2	47.33
道路	99.9	101.4	107.6	102.1	101.1	105.5	106.5	114.6	127.0	107.30

表 5 为各下垫面径流雨水钠吸附率计算表。由表 5 可知,广场、停车场、屋顶、道路径流雨水碱度均处于  $SAR < 10$  范围内,属于 S1 低级危害。

表 5 研究区不同下垫面径流雨水钠吸附率(SAR)

下垫面类型	广场	停车场	屋顶	道路
SAR	2.28	1.90	2.96	1.77

综上所述分析,4 种下垫面径流雨水均为 C1-S1 的低盐度低碱水,可以为绿地灌溉提供良好的水质。

3.4.2 非致癌风险评估 个体通过两种主要途径接

触到雨水径流的剂量分析结果见表 6。将其和相应的参考剂量进行比较,表 7 反映了成人和儿童在两种不同途径(通过口鼻摄入和通过裸露皮肤吸收)接触到雨水径流各重金属元素的危险商(HQ)。

由表 7 可知,对于通过口鼻摄入这一途径,在 4 种下垫面下所有的重金属元素的  $HQ_{ing}$  均  $< 1$ ,仅有 As 元素接近于 1,在道路这一下垫面表现的较为明显。而对于通过裸露皮肤吸收这一途径,除 Fe、Zn 两种元素和通过口鼻摄入保持统一外,其余各元素在不同下垫面下的表现都存在一些区别。

表 6 研究区重金属污染个体每日接受剂量 ADD 计算数值

 $\mu\text{g}/(\text{kg} \cdot \text{d})$ 

元素	广场		停车场		屋顶		道路	
	成人	儿童	成人	儿童	成人	儿童	成人	儿童
口鼻摄入 $\text{ADD}_{\text{ing}}$								
As	1.01 E-01	1.05 E-01	1.29 E-01	1.34 E-01	1.32 E-01	1.37 E-01	2.07 E-01	2.16 E-01
Cd	2.21 E-04	2.30 E-04	2.36 E-04	2.45 E-04	7.67 E-04	7.98 E-04	2.80 E-04	2.92 E-04
Cr	3.81 E-03	3.96 E-03	7.06 E-03	7.35 E-03	8.18 E-03	8.51 E-03	9.19 E-03	9.56 E-03
Cu	3.67 E-01	3.81 E-01	5.70 E-01	5.93 E-01	2.32 E-01	2.41 E-01	3.68 E-01	3.83 E-01
Fe	2.31 E-02	2.40 E-02	1.79 E-02	1.86 E-02	6.53 E-03	6.79 E-03	6.20 E-03	6.44 E-03
Mn	2.07 E-02	2.15 E-02	1.52 E-02	1.58 E-02	1.27 E-02	1.33 E-02	7.97 E-03	8.28 E-03
Pb	1.62 E-02	1.69 E-02	3.80 E-03	3.95 E-03	2.76 E-03	2.87 E-03	3.11 E-03	3.23 E-03
Zn	8.08 E-02	8.41 E-02	4.31 E-02	4.48 E-02	4.72 E-02	4.91 E-02	9.62 E-02	1.00 E-01
裸露皮肤吸收 $\text{ADD}_{\text{derm}}$								
As	5.54 E-01	3.11 E+00	7.08 E-01	3.97 E+00	7.24 E-01	4.06 E+00	1.14 E+00	6.39 E+00
Cd	2.31 E-02	1.29 E-01	2.46 E-02	1.38 E-01	8.01 E-02	4.49 E-01	2.93 E-02	1.64 E-01
Cr	1.57 E+00	8.80 E+00	2.91 E+00	1.63 E+01	3.37 E+00	1.89 E+01	3.79 E+00	2.12 E+01
Cu	3.36 E+00	1.88 E+01	5.22 E+00	2.93 E+01	2.13 E+00	1.19 E+01	3.37 E+00	1.89 E+01
Fe	8.60 E+00	4.82 E+01	6.68 E+00	3.75 E+01	2.43 E+00	1.36 E+01	2.31 E+00	1.29 E+01
Mn	1.80 E+00	1.01 E+01	1.32 E+00	7.42 E+00	1.11 E+00	6.21 E+00	6.93 E-01	3.88 E+00
Pb	7.24 E-01	4.06 E+00	1.69 E-01	9.49 E-01	1.23 E-01	6.90 E-01	1.39 E-01	7.77 E-01
Zn	1.27 E+00	7.09 E+00	6.75 E-01	3.78 E+00	7.39 E-01	4.14 E+00	1.51 E+00	8.44 E+00

通过裸露皮肤吸收这一途径接触到雨水径流的可吸入颗粒物  $\text{HQ}_{\text{derm}}$ 。As 和 Cr 在成人和儿童里相似,其值在 4 种下垫面均  $>1$ 。Cd 和 Mn 的值要低于 As 和 Cr,不同的是其个别值并没有  $>1$ , (已十分接近),这表明 As 和 Cr 可能对健康造成不利影响,并可能通过裸露皮肤吸收这一途径引起潜在的非致癌风险。Cd 和 Mn 也存在同样不利影响,但没有 As 和 Cr 严重;广场、停车场和道路的 Cu 成人的值  $<1$ , 儿童的值  $>1$ , 而在屋顶这一下垫面,成人和儿童的值均  $<1$ 。说明通过裸

露皮肤吸收接触到的雨水径流,广场、停车场和道路的 Cu 都仅对儿童有非致癌风险,屋顶的 Cu 对成人和儿童都没有非致癌风险;而对于 Pb,屋顶、停车场和道路的都仅对儿童有非致癌风险,广场则相反,对成人和儿童均存在非致癌风险。

整体来看,大多元素和多数下垫面,通过裸露皮肤吸收这一途径的  $\text{HQ}_{\text{derm}}$  大于通过口鼻摄入这一途径的  $\text{HQ}_{\text{ing}}$ 。通过裸露皮肤吸收比通过口鼻摄入这一途径接触到雨水径流的重金属元素,具有更大的健康风险。

表 7 研究区山地校园重金属污染危险商 HQ 计算数值

元素	广场		停车场		屋顶		道路	
	成人	儿童	成人	儿童	成人	儿童	成人	儿童
口鼻摄入 $\text{HQ}_{\text{ing}}$								
As	3.36 E-01	3.50 E-01	4.30 E-01	4.47 E-01	4.39 E-01	4.57 E-01	6.91 E-01	7.19 E-01
Cd	4.43 E-04	4.60 E-04	4.72 E-04	4.91 E-04	1.53 E-03	1.60 E-03	5.61 E-04	5.83 E-04
Cr	1.27 E-03	1.32 E-03	2.35 E-03	2.45 E-03	2.73 E-03	2.84 E-03	3.06 E-03	3.19 E-03
Cu	9.17 E-03	9.53 E-03	1.43 E-02	1.48 E-02	5.80 E-03	6.03 E-03	9.21 E-03	9.58 E-03
Fe	3.29 E-05	3.43 E-05	2.56 E-05	2.66 E-05	9.32 E-06	9.70 E-06	8.85 E-06	9.21 E-06
Mn	8.63 E-04	8.98 E-04	6.34 E-04	6.60 E-04	5.31 E-04	5.52 E-04	3.32 E-04	3.45 E-04
Pb	1.16 E-02	1.21 E-02	2.71 E-03	2.82 E-03	1.97 E-03	2.05 E-03	2.22 E-03	2.31 E-03
Zn	2.69 E-04	2.80 E-04	1.44 E-04	1.49 E-04	1.57 E-04	1.64 E-04	3.21 E-04	3.33 E-04
裸露皮肤吸收 $\text{HQ}_{\text{derm}}$								
As	1.95 E+00	1.09 E+01	2.49 E+00	1.39 E+01	2.54 E+00	1.42 E+01	4.00 E+00	2.24 E+01
Cd	9.24 E-01	5.18 E+00	9.86 E-01	5.52 E+00	3.20 E+00	1.80 E+01	1.17 E+00	6.56 E+00
Cr	2.09 E+01	1.17 E+02	3.88 E+01	2.17 E+02	4.50 E+01	2.52 E+02	5.05 E+01	2.83 E+02
Cu	2.80 E-01	1.57 E+00	4.35 E-01	2.44 E+00	1.77 E-01	9.92 E-01	2.81 E-01	1.58 E+00
Fe	6.14 E-02	3.44 E-01	4.77 E-02	2.68 E-01	1.74 E-02	9.74 E-02	1.65 E-02	9.25 E-02
Mn	1.88 E+00	1.05 E+01	1.38 E+00	7.73 E+00	1.16 E+00	6.47 E+00	7.22 E-01	4.05 E+00
Pb	1.72 E+00	9.66 E+00	4.03 E-01	2.26 E+00	2.93 E-01	1.64 E+00	3.30 E-01	1.85 E+00
Zn	2.11 E-02	1.18 E-01	1.12 E-02	6.30 E-02	1.23 E-02	6.90 E-02	2.51 E-02	1.41 E-01

危险指数(HI)评估了由不同途径引起的总潜在非致癌风险。由表 8 可知,HI 和  $HQ_{\text{derm}}$  在参数表现上基本保持一致,这表明这一途径在 HI 中占较大比重;人体通过两种途径接触到雨水径流,Fe, Zn 元素对人体没有非致癌风险;As 和 Cr 是 HI 最高的重金属元素,是雨水径流中非致癌风险最高的两种污染物。Cd 和 Mn 的 HI 低于 As 和 Cr,甚至个别下垫面

值 $<1$ (接近于 1),但仍是会引起非致癌风险的重金属元素;4 种下垫面下,道路径流大多重金属的 HI 高于其余 3 种下垫面,而屋顶的大多低于其余 3 种下垫面,说明道路雨水径流的非致癌风险最大,屋顶的最小;儿童在同一下垫面同一重金属元素的 HI 均高于成人,说明儿童接触到雨水径流比成人更容易受到伤害。

表 8 研究区重金属污染危险指数 HI 计算数值

元素	广场		停车场		屋顶		道路	
	成人	儿童	成人	儿童	成人	儿童	成人	儿童
As	2.28 E+00	1.13 E+01	2.92 E+00	1.44 E+01	2.98 E+00	1.47 E+01	4.69 E+00	2.31 E+01
Cd	9.25 E-01	5.18 E+00	9.86 E-01	5.52 E+00	3.21 E+00	1.80 E+01	1.17 E+00	6.56 E+00
Cr	2.09 E+01	1.17 E+02	3.88 E+01	2.17 E+02	4.50 E+01	2.52 E+02	5.05 E+01	2.83 E+02
Cu	2.89 E-01	1.58 E+00	4.49 E-01	2.45 E+00	1.83 E-01	9.98 E-01	2.90 E-01	1.58 E+00
Fe	6.15 E-02	3.44 E-01	4.78 E-02	2.68 E-01	1.74 E-02	9.74 E-02	1.65 E-02	9.25 E-02
Mn	1.88 E+00	1.05 E+01	1.38 E+00	7.73 E+00	1.16 E+00	6.47 E+00	7.22 E-01	4.05 E+00
Pb	1.74 E+00	9.67 E+00	4.06 E-01	2.26 E+00	2.95 E-01	1.65 E+00	3.32 E-01	1.85 E+00
Zn	2.14 E-02	1.19 E-01	1.14 E-02	6.31 E-02	1.25 E-02	6.92 E-02	2.54 E-02	1.41 E-01

## 4 讨论与结论

(1) 由于较强的人为活动强度,山地校园周边区域的土壤流失随着不同的活动方式进入了下垫面,人流量最大的广场成为 4 种下垫面在径流过程中重金属元素整体变化波动最大的一种,较为频繁的车流的活动导致了燃料、轮胎摩擦等方式产生的路面沉积物,在降雨发生后,因雨水的冲刷和溶解等作用使重金属随着径流迁移,从而使停车场和道路仅有个别元素波动较大(停车场 Fe, Mn, 道路 Mn, Pb),其余重金属元素变化较为稳定,而缺少人为活动和仅依靠大气沉降,重金属污染积累方式较为单一的屋顶径流重金属元素径流过程中整体变化较小。

(2) As 和 Cr 的浓度在径流全过程中,道路始终高于其余 3 种下垫面,且在径流前期出现了明显的梯度,浓度大小为道路 $>$ 屋顶 $>$ 停车场 $>$ 广场。大多重金属元素在产流后的 10 min 出现了降幅,Fe 和 Mn 在广场的降幅较大,达 79.12% 和 89.41%,Zn 在广场、停车场、屋顶的降幅中等,达 52.8%,55.6% 和 33.3%,Cu 在广场、屋顶、道路的降幅较小,只有 10%,38%,3%,表现出了不同的冲刷效应,充分体现了山地校园不同下垫面坡度相对较大,初期冲刷效应明显,污染物在产流后的短时间就发生了较大的降幅的特点。这与王书敏等<sup>[18]</sup>的研究结果一致,他们发现在产流后的 10 min 山地校园人行道和交通干道总氮浓度降幅达 81% 和 32%~58%,初期冲刷效应明显,

同时又在不同下垫面表现出了不同的冲刷效应。

(3) 4 种不同下垫面径流雨水的盐度为  $C_1$ , 碱度为  $S_1$ , 属于低盐度低碱水,符合绿地灌溉用水标准,回用作为绿地灌溉用水对植物没有健康风险。人体通过裸露皮肤吸收这一途径接触到雨水径流的重金属元素比通过口鼻摄入,具有更大的健康风险。As 和 Cr 是雨水径流中非致癌风险最高的两种污染物,道路雨水径流重金属的非致癌风险最大,屋顶的最小,儿童接触到雨水径流比成人更容易受到伤害。

本次研究只监测了山地校园不同下垫面在雨季的降雨径流重金属污染数据,为进一步探索山地校园不同下垫面径流重金属元素污染特征、全面对径流中重金属元素的健康风险进行评估,还需对旱季降雨径流重金属污染进行监测分析。

### [ 参 考 文 献 ]

- [1] 张善发,李田,高廷耀.上海市地表径流污染负荷研究[J].中国给水排水,2006,22(21):57-60.
- [2] 车伍,黄宇,李俊奇,等.北京城区河湖水系治理中的问题与建议[J].环境污染与防治,2005,27(8):593-596.
- [3] 吴丹洁,詹圣泽,李友华,等.中国特色海绵城市的新兴趋势与实践研究[J].中国软科学,2016(1):79-97.
- [4] 俞孔坚,李迪华,袁弘.“海绵城市”理论与实践[J].城市规划,2015,39(6):26-36.
- [5] 李倩倩,李铁龙,赵倩倩,等.天津市路面雨水径流重金属污染特征[J].生态环境学报,2011,20(1):143-148.
- [6] 常静,刘敏,李先华,等.城市地表灰尘一降雨径流系统重金属生物有效性研究[J].环境科学,2009,30(8):



- 2241-2247.
- [7] 陈程,陈明. 环境重金属污染的危害与修复[J]. 环境保护, 2010, 38(3): 55-57.
- [8] 何强,潘伟亮,王书敏,等. 山地城市典型硬化下垫面暴雨径流初期冲刷研究[J]. 环境科学学报, 2014, 34(4): 959-964.
- [9] 何强,彭述娟,王书敏,等. 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, 2012(5): 141-147.
- [10] 李贺,张雪,高海鹰,等. 高速公路路面雨水径流污染特征分析[J]. 中国环境科学, 2008, 28(11): 1037-1041.
- [11] Janardhana Raju N, Shukla U K, Ram P. Hydrogeochemistry for the assessment of groundwater quality in Varanasi: A fast-urbanizing center in Uttar Pradesh, India [J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2011, 173(1/2/3/4): 279-300.
- [12] United States Environmental Protection Agency (USEPA). Risk Assessment Guidance for Superfund (Volume I): Human Health Evaluation Manual (Part E): Supplemental Guidance for Dermal Risk Assessment [Z]. Office of Superfund Remediation and Technology Innovation U. S. Environmental Protection Agency, Washington, DC, 2004.
- [13] Xiao Jun, Wang Lingqing, Deng Li, et al. Characteristics, sources, water quality and health risk assessment of trace elements in river water and well water in the Chinese Loess Plateau [J]. The Science of the Total Environment, 2019, 650(Part 2): 2004-2012.
- [14] 张科峰,李贺,傅大放,等. 3种不同屋面雨水径流重金属污染特性及影响因素分析[J]. 环境科学学报, 2011, 31(4): 724-730.
- [15] 黄金良,杜鹏飞,欧志丹,等. 澳门城市路面地表径流特征分析[J]. 中国环境科学, 2006, 26(4): 469-473.
- [16] Sansalone J J, Buchberger S G. Partitioning and first flush of metals in urban roadway storm water [J]. Journal of Environmental Engineering, 1997, 123(2): 134-143.
- [17] Helmreich B, Hilliges R, Schriewer A, et al. Runoff pollutants of a highly trafficked urban road: Correlation analysis and seasonal influences [J]. Chemosphere, 2010, 80(9): 991-997.
- [18] 王书敏,何强,艾海男,等. 山地城市暴雨径流污染特性及控制对策[J]. 环境工程学报, 2012, 6(5): 1445-1450.
- [19] 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.
- [20] Todd D K, Mays L W. Groundwater hydrology edition [M]. New York: Wiley, 1980: 23-25.

(上接第87页)

- [7] 张兴义,王其存,隋跃宇,等. 黑土坡耕地土壤湿度时空演变及其与大豆产量空间相关性分析[J]. 土壤, 2006, 38(4): 410-416.
- [8] 唐莉,孟令钦,张锋. 黑土区坡耕地侵蚀沟发育机理[J]. 安徽农业科学, 2012, 40(2): 819-821, 827.
- [9] 李浩,张兴义,刘爽,等. 典型黑土区村级尺度侵蚀沟演变[J]. 中国水土保持科学, 2012, 10(2): 21-28.
- [10] 张兴义,祁志,张晟旻,等. 东北黑土区农田侵蚀沟填埋复垦工程技术[J]. 中国水土保持科学, 2019, 17(5): 128-135.
- [11] 张兴义,甄怀才, James R M, 等. 基于 PhotoScan 的径流小区三维重建参数优化[J]. 农业机械学报, 2019, 50(12): 144-150, 230.
- [12] 李朝英,郑路. 利用环刀法测定土壤水分精度的影响因素[J]. 水土保持通报, 2019, 39(2): 118-123.
- [13] 张少良,张兴义,刘晓冰,等. 典型黑土侵蚀区不同耕作措施的水土保持功效研究[J]. 水土保持学报, 2009, 23(3): 11-15.
- [14] 李士文,吴景才. 黑土侵蚀区土壤侵蚀演变规律及对策[J]. 中国水土保持, 1989(4): 7-10.