

城市雨水花园集中入渗对土壤氮、磷、有机碳及重金属的影响

郭超^{1,2,3}, 谢潇^{1,2,3}, 李家科⁴

(1.陕西省土地工程建设集团 自然资源部退化及未利用土地整治工程重点实验室, 陕西 西安 710075; 2.陕西省土地工程建设集团 陕西省土地整治工程技术研究中心, 陕西 西安 710075; 3.陕西省土地工程建设集团 自然资源部土地工程技术创新中心, 陕西 西安 710075; 4.西安理工大学 水利水电学院, 陕西 西安 710048)

摘要: [目的] 研究陕西省西安市雨水花园集中入渗对土壤污染的影响, 为城市雨水径流集中入渗工程技术的合理配置与推广应用提供科学依据。[方法] 以西安理工大学校园内运行 8~9 a 的 2 个雨水花园 (RD₁: 接纳屋面径流雨水; RD₂: 接纳路面和屋面径流的混合雨水) 为研究对象。2016—2018 年对雨水花园 RD₁ 和 RD₂ 监测了 16~18 场降雨事件, 确定其径流中化学需氧量 (COD), 总悬浮物 (TSS), N, P, 重金属的 EMC 浓度和雨水花园单位面积接纳污染物负荷量。2017 年 4 月至 2019 年 2 月, 采集 7 次花园内不同土层深度处的土样, 测定土壤中 NH₄-N, NO₃-N, TN, TP, 总有机碳 (TOC) 及 Cu, Zn, Cd 含量, 明确其在土壤垂向上的分布规律。[结果] RD₁ 径流中 COD, TSS, NH₄-N, TN, TP 的 EMC 浓度均大于 RD₂, 而重金属小于 RD₂。土壤 NH₄-N 和 TN 含量随土层深度增加逐渐减小; NO₃-N 和 TP 含量随土层深度增加逐渐增大, 50 cm 以下不同深度土壤 NO₃-N 和 TP 含量大多大于 0—50 cm 土层。TOC 含量随土层深度逐渐减小。0—30 cm 土壤重金属含量较高, Cu 和 Zn 主要以铁—锰氧化物结合态和残渣态形式存在, 而 Cd 主要以可交换态和碳酸盐结合态形式存在, 雨水花园土壤重金属 Cu, Zn, Cd 与 TOC 具有较好的拟合关系 ($R^2 > 0.8$)。[结论] 雨水花园集中入渗对土壤氮、磷、重金属有一定的影响, NO₃-N 和 TP 发生了淋溶, 土壤 NH₄-N 和 TN 主要富集在 0—50 cm 土层, 重金属主要富集在 0—30 cm 土层。

关键词: 雨水花园; 集中入渗; 土壤 N, P, TOC; 重金属

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2022)01-0026-08

中图分类号: X53

文献参数: 郭超, 谢潇, 李家科. 城市雨水花园集中入渗对土壤氮、磷、有机碳及重金属的影响[J]. 水土保持通报, 2022, 42(1): 26-33. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2022.01.004; Guo Chao, Xie Xiao, Li Jiak. Influence of concentrated infiltration on soil N, P, organic carbon and heavy metals in urban rain gardens [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2022, 42(1): 26-33.

Influence of Concentrated Infiltration on Soil N, P, Organic Carbon and Heavy Metals in Urban Rain Gardens

Guo Chao^{1,2,3}, Xie Xiao^{1,2,3}, Li Jiak⁴

(1. Shaanxi Provincial Land Engineering Construction Group, Key Laboratory of Degraded and Unused Land Consolidation Engineering, Ministry of Natural Resources, Xi'an, Shaanxi 710075, China;

2. Shaanxi Provincial Land Consolidation Engineering Technology Research Center, Shaanxi Provincial Land

Engineering Construction Group, Xi'an, Shaanxi 710075, China;

3. Land Engineering Technology Innovation Center, Ministry of Natural Resources, Shaanxi Provincial Land Engineering Construction Group, Xi'an, Shaanxi 710075, China;

4. College of Water Resources and Hydropower Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an, Shaanxi 710048, China)

Abstract: [Objective] The influence of concentrated infiltration from rainfall runoff on soil of rain gardens in Xi'an City, Shaanxi Province was studied in order to provide a scientific reference for the reasonable configuration and application of concentrated infiltration technology of urban rainfall runoff. [Methods] Runoff data from two rain garden treatments (RD₁: accepting roof rainfall runoff; RD₂: accepting roof and road rainfall

收稿日期: 2021-08-09

修回日期: 2021-10-15

资助项目: 陕西省重点研发项目“城市内河黑臭水体原位综合治理技术开发与应用示范”(2020SF-420); 陕西省土地工程建设集团内部科研项目 (DJNY2020-27, DJNY2021-17)

第一作者: 郭超 (1985—), 女 (汉族), 陕西省府谷县人, 博士, 工程师, 从事水污染与土壤污染研究工作。Email: GCLRF@163.com。

通信作者: 李家科 (1975—), 男 (汉族), 湖北省荆门市人, 博士, 教授, 博士生导师, 从事海绵城市相关方面的研究工作。Email: xaut_ljk@163.com。

runoff) was acquired from 8—9 years on the campus of Xi'an University of Technology. From 2016 to 2018, 16—18 rainfall events were monitored to determine the pollutant load of chemical oxygen demand (COD), total suspended solids (TSS), N, P, and the event mean concentration (EMC) of heavy metals in the rainfall runoff of the two rain gardens. From April 2017 to February 2019, a total of seven soil samples at different soil depths in the two gardens were collected to determine $\text{NH}_4\text{-N}$, $\text{NO}_3\text{-N}$, TN, TP, total organic carbon (TOC), and heavy metals (Cu, Zn, and Cd) to assess the vertical distribution of N, P, TOC, and heavy metal contents in the rain garden soils. [Results] The EMC concentrations of COD, TSS, $\text{NH}_4\text{-N}$, TN, and TP in RD_1 were all greater than those in RD_2 , but opposite results were obtained with regard to heavy metals. The contents of $\text{NH}_4\text{-N}$ and TN showed a gradually decreasing trend with soil depth. However, the contents of $\text{NO}_3\text{-N}$ and TP in the soil gradually increased with soil depth, and they were all greater below 50 cm than the contents in the upper layer (0—50 cm). The TOC content in the rain garden soil showed a gradually decreasing trend with soil depth. Heavy metal contents were large in the 0—30 cm soil layer. Cu and Zn mainly existed in the form of iron-manganese oxide bound state and residue state, while Cd mainly existed in the form of exchangeable and carbonate-bound forms. The contents of Cu, Zn, and Cd in rain garden soil had good relationships with TOC ($R^2 > 0.8$). [Conclusion] Concentrated infiltration in rain gardens had a clear influence on soil N, P, and heavy metals. $\text{NO}_3\text{-N}$ and TP leaching occurred in rain garden soil. The contents of $\text{NH}_4\text{-N}$ and TN in rain garden soil were mainly concentrated in the 0—50 cm soil layer, while heavy metals were mainly concentrated in the 0—30 cm layer.

Keywords: rain garden; concentrated infiltration; N, P and total organic carbon (TOC) in soil; heavy metals

传统城市化带来的城市内涝、水环境污染与地下水缺乏补给等严峻问题,人们通过反思与研究,提出了许多应对之策,如美国的低影响开发(LID)、英国的可持续城市排水系统(SUDS)、澳大利亚的水敏感城市设计(WSUD)等^[1],均取得了良好效果。中国根据自身的水文、地理条件,提出了建设自然积存、自然渗透、自然净化的“海绵城市”的要求。在中国的海绵城市建设中,雨水花园、生物滞留设施等雨水径流集中入渗设施应用较多。这类措施主要利用入渗性能和污染物吸附性能较好的改良材料作为填料,使降雨径流携带的污染物经填料吸附、过滤、离子交换、微生物降解等物理、化学、生物作用得到自然净化,然后下渗补给地下水或收集再次利用,具有减缓城市内涝、净化水质与涵养地下水资源的综合功能。由于城市雨水径流存在严重的面源污染,且集中入渗的水量负荷与污染负荷强度大,长期集中入渗会造成填料堵塞,污染物吸附饱和等众多问题,降低设施运行效率,缩短设施运行寿命,这些都是众多专家非常关注的科学问题^[2]。

目前,国内外研究大多针对雨水花园、生物滞留设施等 LID 设施本身的结构、效果、影响机制与模拟研究展开^[3-5]。如王璐等^[6]将雨水花园与工程隔盐技术相结合,通过室内模拟和正交试验方法,提出适于上海滨海盐碱地区的 3 种雨水花园结构模式。Gurung 等^[7]研究表明雨水花园对降雨径流中氮、磷、重金属具有较好的去除效果。罗鸣等^[8]基于下凹

绿地和雨水花园构建了 SWMM 模型,模拟 1 年一遇、2 年一遇、5 年一遇重现期暴雨时的出水口径流过程及各污染物负荷总量,表明下凹绿地和雨水花园对径流和水质均有一定的削减作用,且雨水花园作用效果更显著。对低影响开发(LID)模式下雨水径流集中入渗对土壤的影响开展了一些研究,如 Kim 等^[9]研究了雨水花园中重金属在土壤中的迁移特性,证实了其会对土壤产生污染;Gunawardena 等^[10]论述了城市雨水径流中常用的雨水入渗技术和城市雨水中主要的污染物,并对这些污染物入渗后的去向进行了调查;Tedoldi 等^[11]认为 SUDS 的普遍应用会对土壤造成影响,并通过文献回顾分析了解决问题的方法。Tedoldi^[11]和 Xie^[12]研究了流体中携带的污染物在土壤环境中的迁移行为和分布规律。但是,近年来,雨水花园集中入渗雨水径流对土壤影响过程的量化分析缺乏系统研究,影响了这类措施的合理使用。

本文对运行 8~9 a 的雨水花园土壤进行多次取样分析,重点研究黄土地区雨水径流集中入渗对土壤氮、磷、重金属含量的影响过程,以期为黄土地区雨水径流集中入渗措施的合理配置与推广应用提供科学依据和理论支撑,促进中国海绵城市的健康发展。

1 研究区概况

试验雨水花园位于陕西省西安市西安理工大学校园内。西安市位于黄河流域中部的陕西关中盆地,

属于大陆性季风气候,平均气温 $13.3\text{ }^{\circ}\text{C}$,冷热干湿,四季分明,冬季干冷,春季干燥,夏季湿热,秋季多雨,属半湿润气候区。根据西安市 1951—2008 年(58 a)的降雨统计资料,多年平均降雨 580.2 mm ,2017 年研究区降水总量为 642.9 mm ,降雨量年际变化相差较大,年最大年降雨量达 903.2 mm (1983 年)。西安市是缺水城市,人均水资源占有量仅为全国的 $1/6$,且地下水超采严重。西安市所在地区的黄土层极为丰厚,黄土入渗性能非常好,且为入渗、滞留自然降雨径流提供了天然的屏障。故以 LID 设施为单个海绵体,用于排除和蓄存雨水径流是海绵城市建设过程中重要的措施,为缓解城市内涝灾害和补充地下水资源匮乏提供良好的天然条件。本研究涉及两个雨水花园 RD_1 和 RD_2 。

雨水花园 RD_1 (图 1a)建成于 2011 年,用于处理办公楼屋面雨水径流,屋面面积,即汇水面积约为 605 m^2 ,雨水花园面积为 30.24 m^2 ,汇流比为 $20:1$ 。上部蓄水层 15 cm ,下部结构层填充西安市本地黄土 20 cm ,渗透系数大约为 2.346 m/d ,结构层以下为原

状土层(未受扰动),花园底部不做防渗处理,雨水径流流经土壤基质直接入渗补给地下水。入流口安装 45° 三角堰,溢流口安装 30° 三角堰。雨水花园 RD_1 东侧 30 m 处有一垃圾场,主要用于收集校园内生活垃圾以及枯枝落叶等,垃圾场底部为水泥混凝土硬质地面,垃圾渗滤液不会发生垂向或水平渗漏,主要是清理不及时带来的少量垃圾碎屑沉积物随径流雨水冲刷而进入花园内。

雨水花园 RD_2 (图 1b)建成于 2012 年,大致为椭圆形,长轴为 6 m ,短轴为 2 m ,雨水花园面积约为 9.42 m^2 ,主要汇集路面和屋面的混合雨水,汇水面积约为 140 m^2 ,汇流比为 $15:1$ 。花园中间用隔板分割为两个面积相同的雨水花园,其中一侧做防渗处理,底部埋设穿孔排水管,排水管周围填筑 15 cm 砾石反滤层;另一侧不做防渗处理,雨水径流可直接入渗补给地下水。在花园入流口安装两个 45° 三角堰,出水口和溢流口安装 30° 三角堰。上部蓄水层 50 cm ,下部填充西安市本地黄土 60 cm ,底层为原状土层(未受扰动)。雨水花园结构见图 2。

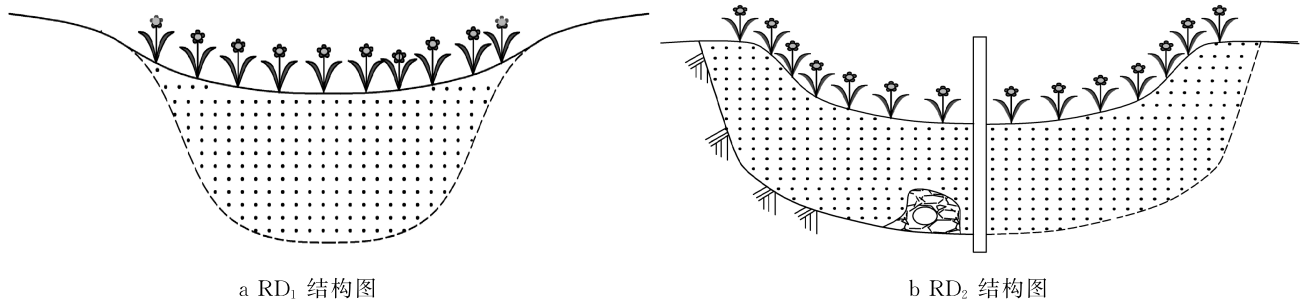


图 1 雨水花园(RD_1 , RD_2)结构图

2 试验方法

每次降雨开始时在入流、出流、溢流三角堰处记录各场次降雨的入流、出流瞬时流量,降雨初期一般每隔 5 min 采集一次进、出水水样,在降雨持续 20 min 后可按照每隔 10 min 采集 1 次进、出水样,降雨持续 1 h 后按照每隔 20 min 或 30 min 采集 1 次进、出水样,一般降雨水样采集数量大于 8 个,现场采集的水样及时放入 $-4\text{ }^{\circ}\text{C}$ 冰箱内,水样分析指标包括 TSS, COD, $\text{NH}_4\text{-N}$, $\text{NO}_3\text{-N}$, TN 和 TP,水质指标一般在 $3\sim 5\text{ d}$ 内分析完毕。

2017 年 4 月至 2019 年 2 月在两个雨水花园 RD_1 和 RD_2 (入渗一侧)内共采集了 7 次土样(距离花园 RD_1 西侧 5 m 处的绿化地中采集一对照土样 CK),土壤含水率保持在 $11.3\%\sim 30.1\%$,pH 值保持在 $7.55\sim 7.76$,呈微碱性,主要测定土壤 N, P, TOC, 重

金属含量。为了保持取样的一致性,一般定于降雨后 $2\sim 3\text{ d}$ 内进行土样采集,采用 3 点(花园 RD_1 为同心圆上 3 点,花园 RD_2 为直线上 3 点)取样混合法采集土样。花园 RD_1 土层深度较深,分 5 层进行采集,分别为 $0\text{—}10, 20\text{—}30, 40\text{—}50, 70\text{—}80, 90\text{—}100\text{ cm}$;雨水花园 RD_2 土层较浅(60 cm),分 3 层进行土样采集,分别为 $0\text{—}10, 20\text{—}30, 40\text{—}50\text{ cm}$;对照组 CK 分 4 层采集,分别为 $0\text{—}10, 20\text{—}30, 40\text{—}50, 70\text{—}80\text{ cm}$ 。样品采集后分成两部分,一部分立即进行含水率测定,另一部分晾在阴凉处,在自然状态下进行通风阴干,剔除其中的草根等杂物,将其充分混匀,采用四分法取少量阴干土壤,过 2 mm 筛,测定 $\text{NH}_4\text{-N}$, $\text{NO}_3\text{-N}$, 另一部分过 1 mm 筛测定 TN, TP, 重金属 Cu, Zn, Cd, 超出最小检测线值记为 0。经处理后的土样放入 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 冰箱内待测,两周内分析完毕。7 次土样采集前降雨情况见表 1,水样和土样分析方法见

表 2。重金属 Cu, Zn, Cd 的形态采用经典的 Tessier 等连续 5 级提取法^[13], 包括可交换态(S_1)、碳酸盐结合态(S_2)、铁—锰氧化物结合态(S_3)、有机结合态(S_4)和残渣态(S_5)。

表 1 7 次土样采集前降雨和入渗状况

降雨时间	土样采集时间	降雨类型	降雨时长/h	降雨量/mm	雨水花园	
					RD ₁	RD ₂
20170426	20170427	中雨	9.33	5.2	2.99	0.70
20170706	20170707	大雨	16.00	28.1	16.15	3.81
20171011	20171014	暴雨	11.17	31.0	17.82	4.20
20180121	20180122	小雨	7.67	5.0	2.87	0.68
20180506	20180507	中雨	10.17	13.4	7.70	1.81
20180928	20180930	大雨	9.50	18.8	10.81	2.55
20190220	20190221	中雨	8.83	8.9	5.12	1.21

表 2 水样和土壤分析方法

测试指标	检测方法	检测仪器	
雨水花园入流水样	COD	重铬酸钾快速消解分光光度法	紫外分光光度计
	TSS	称重法	—
	NH ₄ -N	纳氏试剂比色法	流动分析仪
	NO ₃ -N	紫外分光光度法	流动分析仪
	TN	碱性过硫酸钾消解分光光度法	紫外分光光度计
	TP	过硫酸钾消解钼酸铵分光光度法	紫外分光光度计
	Cu		
Zn	原子吸收分光光度法	原子吸收分光光度计	
Cd			
雨水花园土样	TOC	容量法	滴定管
	NH ₄ -N	LY/T1228-2015	紫外分光光度计
	NO ₃ -N	LY/T1228-2015	紫外分光光度计
	TN	LY/T1228-2015	半自动定氮仪
	TP	LY/T1228-2015	紫外分光光度计
	Cu		
	Zn	土壤元素近代分析法	原子吸收分光光度计
Cd			

3 结果与分析

3.1 雨水花园入流污染物浓度和负荷分析

2016—2018 年对雨水花园 RD₁ 和 RD₂ 监测了 16~18 场降雨事件, 主要采集雨水花园入流水样, 测定其径流中污染物含量, 其径流中各污染物 EMC 浓度和雨水花园单位面积接纳污染负荷量见表 3。

由表 3 可以看出, 雨水花园 RD₁ 入流中 COD, TSS, NH₄-N, TN, TP 等污染指标的平均 EMC 浓度较 RD₂ 大, 但 NO₃-N 和重金属 Cu, Zn, Cd 含量均小于 RD₂。其中 RD₁ 中 COD 的 EMC 浓度是 RD₂ 的 1.80 倍, 单位面积接纳污染负荷量是 RD₂ 的 2.44 倍。说明 RD₁ 径流受有机物污染较为严重, 降雨径流进入雨水花园后将破坏土体平衡, COD 的降解将会消

耗土体中氧气, 成为厌氧状态, 影响生物生存^[14]。雨水花园 RD₁ 东侧 30 m 处有一校园垃圾场, 垃圾场 3 面设有高 2 m 的水泥围墙(敞开一面背离雨水花园), 受校园垃圾日常清扫、垃圾装卸等活动的影响, 雨水花园 RD₁ 汇水渠中堆积的粉尘较多, 夏季降雨突然来不及清扫时, 粉尘随径流会进入 RD₁ 中, 导致雨水花园 RD₁ 径流中 TSS, N, P 等污染物含量较高。

表 3 雨水花园入流 EMC 浓度和单位面积接纳的污染负荷量(2016—2018 年)

指标	RD ₁		RD ₂	
	平均 EMC 浓度/(mg·L ⁻¹)	单位面积接纳污染负荷量/(g·m ⁻²)	平均 EMC 浓度/(mg·L ⁻¹)	单位面积接纳污染负荷量/(g·m ⁻²)
COD	103.91	1 179	57.78	483
TSS	93.55	1 062	65.04	544
NH ₄ -N	2.45	28	1.14	10
NO ₃ -N	1.11	13	1.57	12
TN	4.24	48	3.09	27
TP	0.32	4	0.23	2
Cu	0.044	0.662	0.106	1.201
Zn	0.281	4.212	0.630	7.102
Cd	0.022	0.032	0.031	0.035

雨水花园 RD₂ 中重金属含量较高, 其中重金属 Cu, Zn 的 EMC 含量分别是 RD₁ 的 2.41, 2.24 倍, 单位面积接纳污染负荷量分别是 RD₁ 的 1.81, 1.69 倍, 说明重金属含量主要来自路面径流。主要是由于城市道路行驶车辆较多, 汽车尾气排放、油脂泄露、车胎磨损将导致路面沉积物中重金属 Zn 含量升高。韦毓韬等^[15]研究表明, 道路雨水径流中 Cu, Zn, Cd, Pb 等重金属主要受交通因素的影响。

3.2 土壤 N, P, TOC 含量垂向分布

雨水花园 0—100 cm 不同土层深度 N, P 含量如图 3 所示。

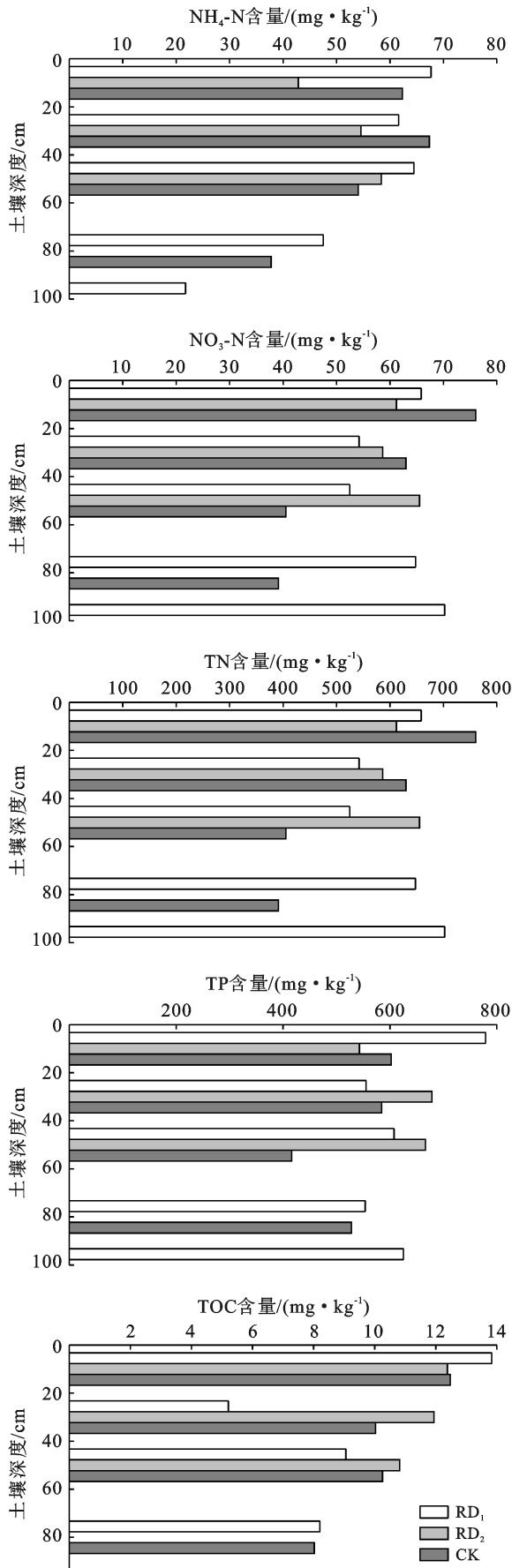


图2 雨水花园中土壤N,P和TOC垂向分布特征

由图2可以看出,雨水花园和CK土壤中NH₄-N和TOC含量随土层深度增加呈逐渐递减的趋势,上层土壤中NH₄-N和TOC含量明显高于下层土壤。其中RD₁土壤中NH₄-N含量由表层下10 cm的67.69 mg/kg降低至表层下100 cm的21.75 mg/kg,降低了211.18%。这主要是由于降雨径流中NH₄-N主要以颗粒态形式存在,进入雨水花园后被拦截在表层土壤。此外,NH₄-N主要带正电荷,而土壤大多带负电荷,雨水径流中NH₄-N易吸附在土壤胶体表面,在降雨冲刷作用下不易随水分向下迁移。RD₁土壤中TOC含量由表层下10 cm的13.83 g/kg降低至表层下100 cm的5.42 g/kg,降低了155.38%。随取样深度增加,雨水花园和CK土壤中NO₃-N含量呈增加趋势,上层土壤中NO₃-N含量小于下层土壤。RD₁土壤中NO₃-N含量由表层下10 cm的65.84 mg/kg增加至表层下100 cm的70.23 mg/kg,下层土壤NO₃-N含量比上层增加了6.68%。这就说明降雨径流中NO₃-N进入土壤后发生了淋溶现象,NO₃-N随水分入渗易向下迁移。王禄等^[16]通过人工滤柱试验发现,NH₄-N主要集中在表层下50 cm土壤,并随滤池深度增加呈逐渐降低的趋势,而NO₃-N随水流被快速排除试验系统。有关研究表明^[17],硝酸盐作为阴离子不被土壤介质所吸附,在土壤/水系统中通常具有很强的移动性。与NH₄-N含量的变化规律一致,雨水花园土壤中TN含量随土层深度增加呈逐渐减小的趋势。雨水花园土壤中TP含量随土层深度增加逐渐增大,而CK土壤中TP含量随深度增加呈减小趋势。RD₁不同层深度TP含量分别为250.56, 239.93, 273.09, 366.49, 485.83 mg/kg,表层下100 cm土壤TP含量较表层下10 cm增加了93.90%。说明雨水花园土壤中可溶性磷随水分入渗发生了明显的迁移作用,具有显著的深层富集现象。因此,雨水花园、生物滞留设施不宜用于地下水位较高的地区,若确实需要应用,需做好前处理,避免硝酸盐和磷酸盐的淋溶而发生次生灾害。

3.3 土壤重金属垂向分布

将雨水花园2017年4月至2019年2月采集的7次土样中3种重金属含量分别取均值,得到雨水花园土壤重金属含量在垂向上的分布规律(图3)。

由图3可以看出,雨水花园和CK土壤重金属Zn和Cd大多富集在土壤表层下30 cm范围内,并且土壤Cd含量随土层深度增加呈逐渐减小的趋势。土壤中重金属Cu的分布较均匀,RD₁的90—100 cm和RD₂的40—50 cm土层中Cu含量略大于其他各层,而CK表层土壤重金属Cu含量略大于其他各层。研

究表明,城市道路径流雨水中重金属 Zn 的主要来源于车辆轮胎磨损、发动机润滑油泄漏;重金属 Cu 的主要来源于金属电镀、车辆轴承及制动部件磨损;重金属 Cd 主要来源于车辆轮胎磨损^[18]。董微砾^[19]研究新疆乌鲁木齐市城市道路雨水中重金属 Cu 平均值为 209.7~237.4 $\mu\text{g/L}$, Zn 平均值为 530.4~745.5 $\mu\text{g/L}$, Cd 平均值为 0.7~3.3 $\mu\text{g/L}$ 。Xie 等^[12]通过大量研究认为 Zn 在市区的主要来源是车辆的轮胎磨损、制动磨损、大气干湿沉积和石油、天然气的燃烧作用。

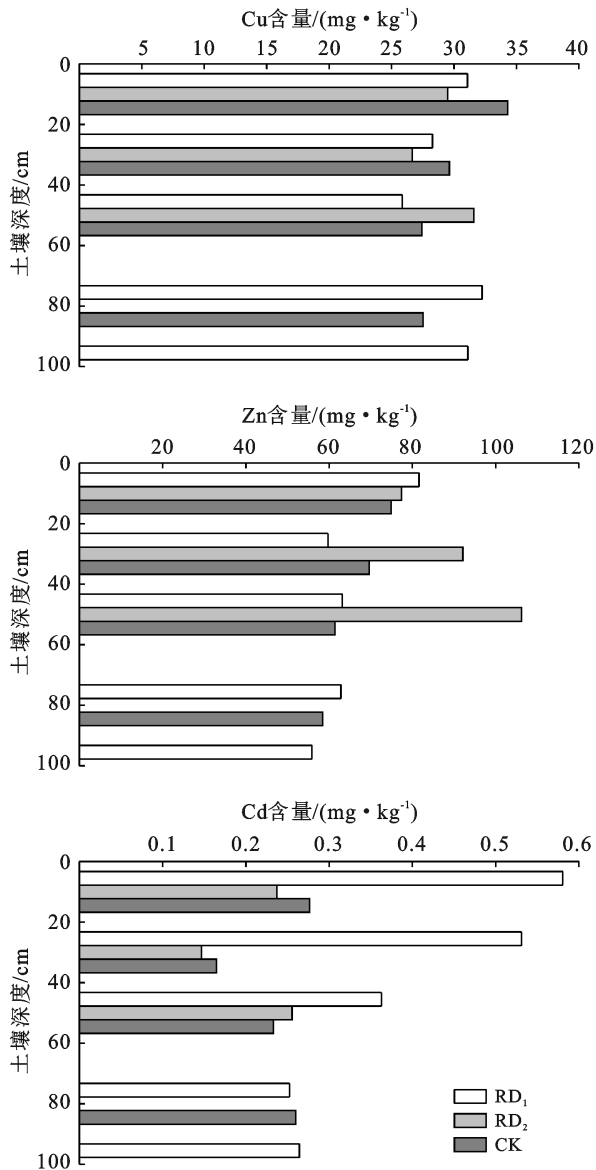


图 3 雨水花园土壤重金属垂向分布特征

降雨径流导致了雨水花园土壤中重金属含量的增加,0—50 cm 土层,雨水花园 RD₁ 和 RD₂ 土壤 Zn 含量分别为 81.58, 70.66, 59.73, 56.93, 58.48 mg/kg 和 77.36, 84.74, 92.13, 99.18, 106.23 mg/kg, 可以看出,除表层土壤(0—10 cm)外,其余各层土壤,雨水

RD₂ 中 Zn 含量分别是 RD₁ 的 1.20, 1.54, 1.74, 1.68 倍,表明雨水花园土壤 Zn 含量受降雨汇水面类型的影响较大,汇水面为道路的雨水花园,其土壤中重金属 Zn 含量明显高于汇水面为屋面的雨水花园由于 RD₂ 主要接纳路面径流,故 RD₂ 入流水质中 Zn 浓度远高于 RD₁。

不同汇水面对雨水花园土壤中重金属 Cd 的影响也不同,0—50 cm 各层土壤,雨水花园 RD₁ 土壤 Cd 含量分别为 0.581, 0.531, 0.363 mg/kg, RD₂ 土壤重金属 Cd 分别为 0.237, 0.147, 0.256 mg/kg, 而 CK 土壤分别为 0.277, 0.165, 0.233 mg/kg。可以看出,雨水花园 RD₂ 和 CK 土壤中 Cd 含量差异较小,但 RD₁ 土壤 Cd 含量远大于 RD₂ 和 CK,分别是 RD₂ 和 CK 的 2.45, 3.62, 1.42, 2.09, 3.22, 1.56 倍。分析其原因,主要是受 RD₁ 东侧的垃圾场影响。雨水花园 RD₁ 主要汇集屋面径流,降雨径流经坡屋面自由落水进入地面汇水沟后集中进入雨水花园,而垃圾场西侧正好为雨水花园部分地面汇水沟,每天校园内清理垃圾时,有大量粉尘落入东侧地面汇水沟和雨水花园 RD₁,粉尘中可能含有重金属 Cd,在降雨冲刷作用下进入了雨水花园,导致雨水花园 RD₁ 中 Cd 含量远大于 RD₂。

3.4 土壤重金属与 TOC 的关系

由图 4 可以看出,土壤中重金属 Cu 和 Zn 与土壤有机碳(TOC)呈直线关系, R^2 分别达 0.840, 0.861, 重金属 Cd 与 TOC 呈二次曲线关系, R^2 达 0.802。TOC 是通过微生物作用所形成的腐殖质、动植物残体和微生物体的合称,土壤 TOC 是雨水花园径流雨水中重金属的重要载体,TOC 含量较高的土壤可有效削减径流雨水中的重金属,从而减少重金属对土壤中动、植物的危害,并且可防止重金属向下迁移,影响地下水水质。王腾云等^[20]通过福建沿海地区土壤—稻谷重金属含量关系与影响因素研究,发现富含有机碳的土壤条件有利于阻断稻谷对土壤 Cd 的吸收,降低土壤 Cd 污染的生态风险。谢娜等^[21]通过研究不同土地利用方式土壤有机碳变化特征及与重金属的相关性,发现典型土壤重金属 Hg, Cd, Cr, As, Pb 与 SOC 储量之间存在显著相关性,园地和建设用地最高 $r=0.99$,林地和耕地次之,分别为 $r=0.87$ 和 $r=0.86$ 。可见土壤中 TOC 与土壤重金属具有密切相关性。

3.5 土壤重金属形态分布

可交换态和碳酸盐结合态两种形态的重金属不大稳定,随水分入渗易向下迁移,铁—锰氧化物结合态、有机结合态和残渣态在土壤中的存在形态较稳定。重金属 Cu, Zn, Cd 的各形态含量如图 5 所示。

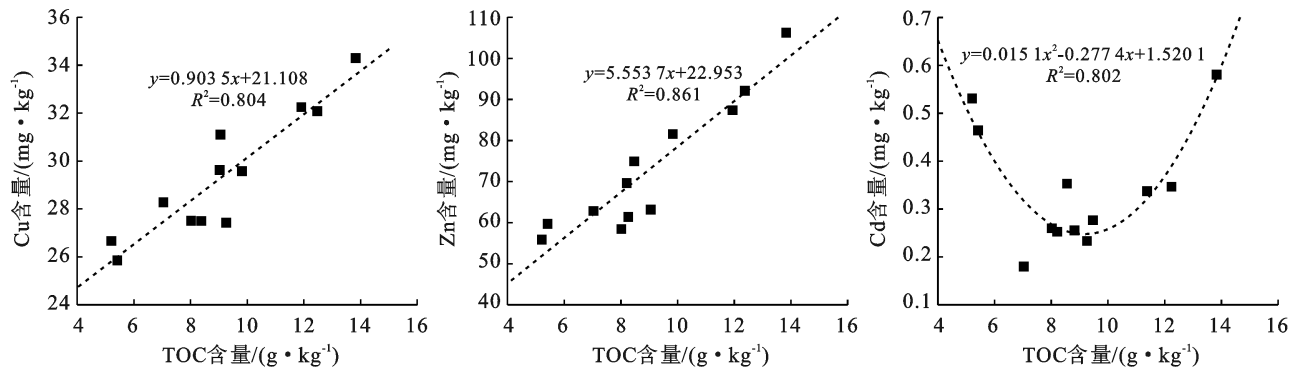


图 4 雨水花园土壤重金属与 TOC 的关系

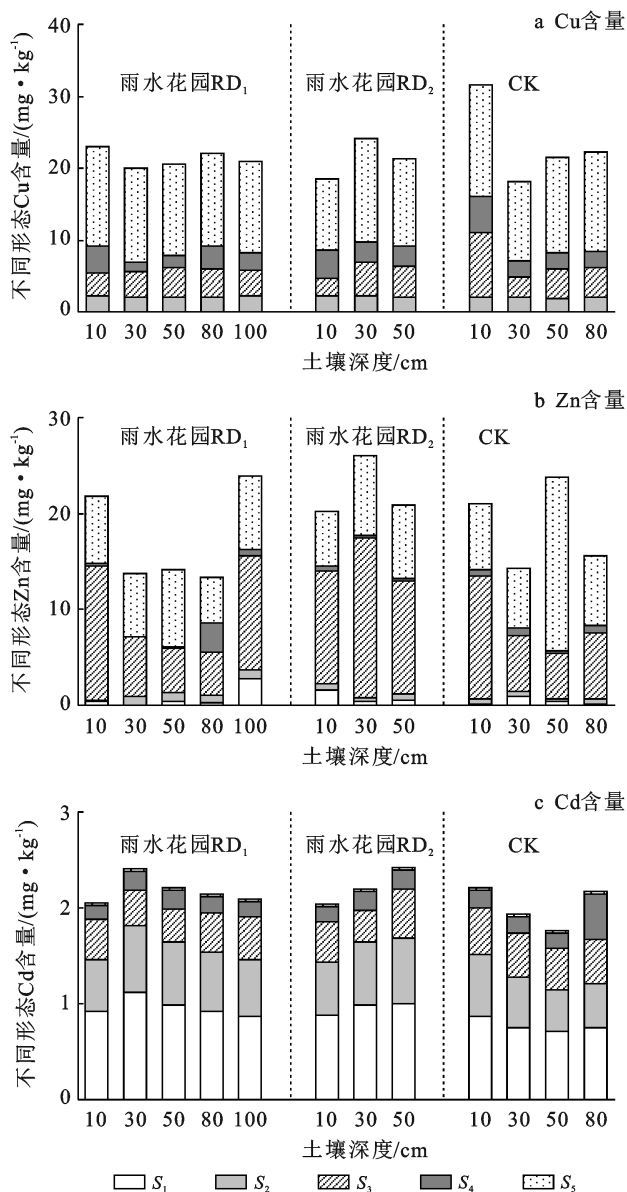
注: S_1 — S_5 为重金属的不同形态, S_1 为可交换态, S_2 为碳酸盐结合态, S_3 为铁—锰氧化物结合态, S_4 为有机结合态, S_5 为残渣态。

图 5 雨水花园土壤重金属各形态含量

由图 5 可以看出,雨水花园和 CK 土壤中重金属 Cu 的 5 种形态关系为: $S_5 > S_3 > S_4 > S_2 > S_1$, 而 Zn

的 5 种形态关系为: $S_3 > S_5 > S_2 > S_4 > S_1$ 。故雨水花园土壤中重金属 Cu 和 Zn 主要以铁—锰氧化物结合态和残渣态形式存在,存在形态相对稳定,随水分入渗不易发生向下迁移。雨水花园和 CK 土壤中重金属 Cd 的 5 种存在形态与 Cu 和 Zn 明显不同,其关系为: $S_1 > S_2 > S_3 > S_4 > S_5$,由此可见雨水花园土壤中 Cd 主要以可交换态和碳酸盐结合态形式存在,这就说明 Cd 在土壤中很不稳定,随水分入渗有向下迁移的风险,易进入地下水。

4 结论

(1) 雨水花园汇水面类型影响降雨径流中污染物浓度,雨水花园 RD_1 入流中 COD, TSS, N, P 等污染物含量较高,而雨水花园 RD_2 入流中重金属含量远高于 RD_1 。

(2) 受降雨径流集中入渗污染影响,雨水花园 0—50 cm 土壤 $\text{NH}_4\text{-N}$ 和 TN 含量较高。土壤 $\text{NH}_4\text{-N}$, TN 和 TOC 随土层深度增加逐渐减小,而 $\text{NO}_3\text{-N}$ 和 TP 随土层深度增加逐渐增大,发生了明显的淋溶。

(3) 雨水花园土壤重金属大多集中在 0—30 cm 范围。Cu 和 Zn 主要以铁—锰氧化物结合态和残渣态形式存在, Cd 主要以可交换态和碳酸盐结合态形式存在,随水分入渗易向下迁移。雨水花园土壤重金属与 TOC 具有较好的拟合关系 ($R^2 > 0.8$)。

[参 考 文 献]

- [1] Fletcher T D, Shuster W, Hunt W F, et al. SUDS, LID, BMPs, WSUD and more-The evolution and application of terminology surrounding urban drainage [J]. Urban Water Journal, 2015, 12(7): 525-542.
- [2] Mehring A S, Hatt B E, Kraikittikun D, et al. Soil invertebrates in Australian rain gardens and their potential roles in storage and processing of nitrogen [J]. Ecological Engineering, 2016, 97: 138-143.
- [3] Jia Zhonghua, Tang Shuangcheng, Luo Wan, et al.

- Small scale green infrastructure design to meet different urban hydrological criteria [J]. *Journal of Environmental Management*, 2016, 117:92-100.
- [4] 郭效琛, 杜鹏飞, 辛克刚, 等. 基于监测与模拟的海绵城市典型项目效果评估[J]. *中国给水排水*, 2019, 35(11): 130-134.
- [5] 李家科, 张兆鑫, 蒋春博, 等. 海绵城市生物滞留设施关键技术研究进展[J]. *水资源保护*, 2020, 36(1): 1-8.
- [6] 王璐, 于冰沁, 陈嫣, 等. 上海滨海盐碱地区雨水花园适应性结构设计: 以临港海绵城市建设示范区为例[J]. *上海交通大学学报(农业科学版)*, 2019, 37(4): 29-36.
- [7] Gurung S B, Geronimo F K, Hong J, et al. Application of indices to evaluate LID facilities for sediment and heavy metal removal [J]. *Chemosphere*, 2018, 206: 693-700.
- [8] 罗鸣, 叶兴成, 王飞, 等. 下凹绿地与雨水花园在小区尺度应用中的对比[J]. *节水灌溉*, 2018(2): 117-121.
- [9] Kim B S M, Salaroli A B, Ferreira P A D L, et al. Spatial distribution and enrichment assessment of heavy metals in surface sediments from Baixada Santista, Southeastern Brazil [J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2016, 103(1/2): 333-338.
- [10] Gunawardena J, Egodawatta P, Ayoko G A, et al. Atmospheric deposition as a source of heavy metals in urban stormwater [J]. *Atmospheric Environment*, 2013, 68: 235-242.
- [11] Tedoldi D, Chebbo G, Pierlot D, et al. Impact of runoff infiltration on contaminant accumulation and transport in the soil/filter media of Sustainable Urban Drainage Systems: A literature review [J]. *Science of the Total Environment*, 2016, 569/570: 904-926.
- [12] Xie Yunfeng, Chen Tongbin, Lei Mei, et al. Spatial distribution of soil heavy metal pollution estimated by different interpolation methods: accuracy and uncertainty analysis [J]. *Chemosphere*, 2011, 82(3): 468-476.
- [13] Tessier A, Campbell P G C, Bisson M. Sequential extraction procedure for the speciation of particulate trace metals [J]. *Analytical Chemistry*, 1979, 51(7): 844-851.
- [14] 蔡俊驰, 李嘉, 任婷婷, 等. 水质因子对白鹤滩藻类生长影响模拟试验研究[J]. *四川大学学报(工程科学版)*, 2014, 46(S1): 37-41.
- [15] 韦毓韬, 姜应和, 张校源, 等. 雨水径流中重金属污染现状及其相关性分析[J]. *环境保护科学*, 2018, 44(5): 68-72.
- [16] 王禄, 喻志平, 赵智杰. 人工快速渗滤系统氨氮去除机理[J]. *中国环境科学*, 2006, 26(4): 500-504.
- [17] Li Liqing, Davis A P. Urban Storm-water runoff nitrogen composition and fate in bioretention systems [J]. *Environment Science & Technology*, 2015, 48(6): 3403-3410.
- [18] 申丽勤, 车伍, 李海燕, 等. 我国城市道路雨水径流污染状况及控制措施[J]. *中国给水排水*, 2009, 25(4): 23-28.
- [19] 董微砾. 速城市化地区雨水径流重金属污染特征研究: 以乌鲁木齐市为例[D]. 新疆乌鲁木齐: 新疆师范大学, 2014.
- [20] 王腾云, 周国华, 孙彬彬, 等. 福建沿海地区土壤—稻谷重金属含量关系与影响因素研究[J]. *岩矿测试*, 2016, 35(3): 295-301.
- [21] 谢娜, 冯备战, 李春亮. 不同土地利用方式土壤有机碳变化特征及与重金属的相关性分析[J]. *中国农学通报*, 2019, 35(26): 115-120.