

黄志伟, 曾凡棠, 石雷, 等. 东江流域不同地类非点源污染排放特征[J]. 农业环境科学学报, 2016, 35(5):940–946.

HUANG Zhi-wei, ZENG Fan-tang, SHI Lei, et al. Characteristics of non-point source pollutant discharges from different types of land use in Dongjiang River Basin[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2016, 35(5):940–946.

东江流域不同地类非点源污染排放特征

黄志伟^{1,2}, 曾凡棠², 石雷^{1*}, 林澍^{2*}, 房怀阳², 刘跃丹²

(1.暨南大学环境学院, 广州 510632; 2.环境保护部华南环境科学研究所广东省水与大气污染防治重点实验室, 广州 510535)

摘要:以东江流域为研究对象, 选取不同土地利用类型小区进行野外径流场试验, 研究自然降雨过程中不同地类常规污染物与典型重金属的非点源污染排放特征。结果表明, 农业用地水质较差, 是流域内的主要非点源, 但公路重金属污染物也不容忽视。庭院、公路和菜地地表径流污染物浓度与径流量相关性显著, 而水田与林地则相关性差, 主要是由同一小区二次降雨间隔差别大与地面特性引起的。庭院 SS 与 COD 发生显著初期冲刷现象, TN、TP 与重金属 (Cu、Pb、Zn 及 As) 初期冲刷不显著, 公路、菜地、水田、林地, 则大部分指标都发生了明显的初期冲刷现象, 同时部分场次降雨中也会出现二次冲刷的现象。不同污染物的初期冲刷现象显著程度规律为 SS>COD>Pb>TN>Zn>TP>Cu>As, 常规污染物的初期效应比重金属显著, 重金属的初期效应更易受到用地类型的影响; 对比不同用地类型, 则农用地更易发生初期冲刷现象, 但公路径流中重金属污染物也存在显著初期冲刷现象。降雨量、降雨强度及二次降雨间隔是影响初期冲刷现象的显著因素。

关键词: 非点源污染; 流域; 土地利用类型; 初期冲刷现象

中图分类号: X53 文献标志码: A 文章编号: 1672-2043(2016)05-0940-07 doi:10.11654/jaes.2016.05.018

Characteristics of non-point source pollutant discharges from different types of land use in Dongjiang River Basin

HUANG Zhi-wei^{1,2}, ZENG Fan-tang², SHI Lei^{1*}, LIN Shu^{2*}, FANG Huai-yang², LIU Yue-dan²

(1.School of the Environment, Jinan University, Guangzhou 510632, China; 2.The Key Laboratory of Water and Air Pollution Control of Guangdong Province, South China Institute of Environmental Sciences, MEP, Guangzhou 510535, China)

Abstract: Field studies were conducted to evaluate the discharge characteristics of nutrient pollutants and typical heavy metals in runoffs due to rainfall under different types of land use in Dongjiang River Basin. Results indicated that the runoff from agricultural land was the main non-point pollution source in Dongjiang River Basin, while the heavy metal emissions from highway could not be ignored. In courtyard, the first flush effect (FFE) was significant for suspended solids (SS) and chemical oxygen demand (COD), but insignificant for the contamination of total nitrogen (TN), total phosphorous (TP) and heavy metals (e.g., As, Cu, Pb and Zn). For traffic roads, vegetable field, paddy field, and woodland, however, FFEs were observed for most of the pollutants. The secondary flush effect was observed at the late stage of raining. Pearson correlation analysis showed that the correlation between pollution load and runoff flow was significant under the courtyards, traffic road and vegetable fields, but insignificant for the cropland and woodland, mainly due to the great difference in the rainfall interval and characteristics. The FFE was in order of SS>COD>Pb>TN>Zn>TP>Cu>As. In general, FFE was more obvious for the nutrient pollutants than for the heavy metals. Land use types greatly influenced heavy metals. Of different types of land use, FFE was the most observed in agricultural land. However, for traffic roads, FFEs were found mainly for heavy metals. In conclusion, rainfall quantity, rainfall intensity and rain interval are main factors influencing FFE.

Keywords: non-point source pollution; basin; land use type; first flush effect

收稿日期: 2016-01-13

基金项目: 国家科技重大专项: 东江流域饮用水源型河流水质安全保障技术集成与综合示范(2014ZX07206005); 广东省公益研究与能力建设专项(2015A020216011); 广州市科技计划项目(201510010294)

作者简介: 黄志伟(1990—), 男, 硕士研究生, 研究方向为水处理技术。E-mail: dewills_huang@163.com

* 通信作者: 石雷 E-mail: shilei9899@163.com; 林澍 E-mail: linshu@scies.org

随着经济快速发展和人口数量的激增,流域污染问题日趋严重,而由降雨(或融雪)冲刷作用引起的非点源污染则是流域的主要污染源^[1]。相关研究表明,即使点源污染被全面控制以后,地表水体河流水质达标率也不超过65%,甚至部分指标非点源污染负荷超过点源污染^[2-3]。“水十条”明确提出关于流域污染治理目标,使得流域非点源污染成为治理水污染的主要任务和重点。

目前关于非点源污染的主要研究内容包括非点源污染机理研究、非点源污染时空变化规律性研究及环境因子(包括地形、降雨条件、土地利用类型和土壤类型等)对产汇污影响的研究等^[4-7],研究形式以野外试验^[8-9]及数值模拟^[10-11]为主。本文以东江流域为研究对象,分别于城镇区、农业区进行野外非点源径流场试验,研究自然降雨过程中东江流域不同地类常规污染物与重金属的非点源污染排放特征,以期为非点源污染控制提供依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

东江流域是珠江水系干流之一,发源于江西寻乌,自东北向西南流经广东河源、惠州、东莞等市,于虎门入海,干流全长562 km,全流域集水面积35 340 km²,属亚热带季风性湿润气候区,干湿季节分明,年平均降雨量为1750 mm,平均气温21.7℃。东江担负着为广东省和香港特别行政区4000多万人供水的重任,因此对东江水质的保护具有重要意义。东江流域内城镇用地约占10%,耕地约占9%,园地约占6%,林地约占72%,随着社会经济的快速发展,流域内土地利用变化显著,带来严重的环境负荷^[12]。

1.2 径流试验小区的设置

根据东江流域的土地利用的类型、面积和分布情况^[12],试验于东江流域下游东莞市区选取城市用地代表地块,设置庭院与公路径流场小区;农业用地代表地块则位于流域上游的惠州、河源,设置菜地、水田与林地径流场小区。基本概况见表1。在径流场集水区安装雨量计、小区出口处加装三角流量堰,分别进行流量、雨量观测,同时加装自动装置实现水质自动采样系统(ISCO6172)。

1.3 样品采集及分析方法

于2015年雨季共采集到7场有效降雨(表2),径流场监测在降雨开始产流时采集,降雨前期30 min内采样频率为5 min/次,30~60 min期间为10 min/次,

表1 径流场基本概况

Table 1 Characteristics of field runoff plots

编号	土地利用	坡度/(°)	覆盖率/%	面积/m ²	土壤
A1	庭院	<1	—	200	—
A2	公路	<1	—	30	—
B1	菜地	1~3	20~60	180	酸性赤红壤
B2	水田	<1	60~80	150	潜育型潮沙泥田
B3	林地	10~18	80~90	100	酸性赤红壤

表2 降雨事件记录

Table 2 General records of rainfall events

径流场类型	降雨事件	发生日期月/日	总降雨量/mm	降雨强度/mm·min ⁻¹	降雨历时/min	二次降雨间隔/d
庭院	1	06/23	16	0.229	70	7
	2	08/28	21	0.292	72	12
	3	08/29	33.5	0.322	104	1
公路	1	06/23	16	0.229	70	10
	2	08/28	21	0.292	72	12
	3	08/29	33.5	0.322	104	1
菜地	2	06/23	16	0.292	70	10
	3	08/29	33.5	0.322	104	1
水田	4	07/09	52	0.335	155	13
	5	08/10	27.5	0.275	100	12
林地	6	07/09	65	0.464	140	15
	7	09/20	50	0.500	100	3

60 min后为30 min/次,直至降雨结束。分析项目包括常规污染物指标SS、TN、TP、COD_{Cr}及重金属铜(Cu)、铅(Pb)、锌(Zn)和砷(As),所有水质项目按照国家水质分析标准进行测定。

1.4 数据处理方法

1.4.1 事件平均浓度(EMC)的计算

受降雨条件及下垫面特点的影响,同一区域在不同降雨事件中或不同区域在同一场次降雨事件中的污染物质浓度差异很大^[7]。本研究采用美国环保署建议使用的流量加权平均浓度(Event mean concentrations, EMC)进行径流水质分析,其计算方法如下:

$$EMC = \frac{M}{V} = \frac{\int_0^t C_t Q_t dt}{\int_0^t Q_t dt} = \frac{\sum_{i=1}^{i=n-1} \frac{C_i + C_{i+1}}{2} \cdot \frac{Q_i + Q_{i+1}}{2} \cdot \Delta t_i}{\sum_{i=1}^{i=n-1} \frac{Q_i + Q_{i+1}}{2} \cdot \Delta t_i}$$

式中:EMC为径流污染平均浓度,mg·L⁻¹;M为径流总污染量,g;V为径流总量,m³;t为降雨时间,s;C_t为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为采样时间间隔,s。

1.4.2 初期冲刷的判定

初期冲刷现象(FFE, First flush effect)于 20 世纪 80 年代在雨水径流污染控制中首次提出,是非点源污染控制研究中的重要问题。在如何准确描述初期冲刷现象方面,目前应用比较多的是 Geiger 提出的质量初期冲刷理论,即以污染物的累积污染负荷与累积径流量的无量纲累积曲线 $M(V)$ 的发散来直观判断是否发生了初期冲刷现象。为进一步量化描述初期冲刷现象,可采用初期冲刷比值 MFF_n 来描述初期冲刷程度,其计算公式如下:

$$MFF_n = \frac{\int_0^t C_t Q_t dt}{M} \cdot \frac{V}{\int_0^t Q_t dt}$$

式中: n 为径流百分比, 0~100%; M 为总污染量, g; V 为径流总量, m^3 ; t 为时间, s; C_t 为 t 时刻污染物的浓度, $mg \cdot L^{-1}$; Q_t 为 t 时刻径流流量, $m^3 \cdot s^{-1}$ 。

2 结果与讨论

2.1 不同地类污染物流失一般规律及影响因素分析

流量加权平均浓度 EMC 可较为科学直观地判定降雨径流水质。本试验统计了 5 个小区雨水径流的常

规污染物与重金属的 EMC 值,并与《地表水环境质量 GB3838—2002》中的 V 类水标准进行比较分析(表 3)。结果表明,不同土地利用类型污染物排放规律差别较大,从各降雨事件 EMC 的平均值分析,SS、COD 浓度从高到低顺序为菜地>林地>水田>公路>庭院;TN 为菜地>水田>公路>庭院>林地;TP 为水田≈菜地>林地>公路>庭院。农用地雨水径流 SS、COD、TN、TP 污染物平均浓度明显高于城市用地,表明农业用地水质较差,是流域内的主要非点源。

对于农业用地类型,降雨强度及施肥是径流水质的关键影响因素。菜地、水田、林地径流 COD 分别是 V 类水标准的 2.3、1.6、1.9 倍, COD 易吸附在泥沙上而以颗粒态的形态流失,与 SS 相关性很高,因此两者具有相似的非点源排放负荷规律^[13-15]。农业用地下垫面硬化度低,土壤直接受到降雨径流的冲刷、侵蚀而产生污染物,因此降雨强度是 COD、SS 的主要影响因素。各用地类型 TN 是 V 类水标准 1.11~7.25 倍,菜地、水田的 TP 是 V 类水标准 2.5 倍。农业用地 N、P 污染物则可能受到施肥的影响,明显高于城市用地,据调查可知径流小区所种植的农作物生长期需施用大量复合肥,其中磷肥约为 $150 \text{ kg P}_2\text{O}_5 \cdot \text{hm}^{-2}$,同时,一般情况下赤红壤与潮沙泥田对磷肥的保蓄能力也较其他肥料强^[16-17]。

表 3 不同下垫面雨水径流 EMC 值/ $mg \cdot L^{-1}$
Table 3 EMC of runoff under different land-use types

用地类型	降雨事件	SS	COD	TN	TP	Cu	Pb	Zn	As
庭院	1	12.67	45.19	1.05	0.07	0.013 58	—	0.018 94	0.000 20
	2	26.26	33.86	6.21	0.41	0.011 61	0.028 78	0.059 73	0.005 53
	3	15.56	24.59	2.37	0.03	0.000 56	0.001 27	0.002 54	0.000 42
	平均值($n=3$)	18.16	34.55	3.21	0.17	0.010 97	0.015 02	0.027 07	0.002 05
公路	1	15.32	66.70	2.35	0.24	0.021 79	0.037 54	0.098 03	0.003 66
	2	80.16	55.35	5.28	0.37	0.031 29	0.017 75	0.109 44	0.005 06
	3	13.37	46.96	3.01	0.19	0.013 01	0.015 15	0.079 54	0.004 82
	平均值($n=3$)	36.28	56.34	3.55	0.26	0.022 03	0.023 48	0.095 67	0.004 52
菜地	2	89.42	25.46	12.04	0.35	0.004 27	0.012 48	0.018 54	0.002 46
	3	975.04	160.80	16.96	2.37	0.006 44	0.012 81	0.065 26	0.003 56
	平均值($n=2$)	532.23	93.13	14.50	1.36	0.005 35	0.012 65	0.041 90	0.003 01
水田	4	27.73	17.80	4.65	0.67	0.001 56	0.001 74	0.002 94	0.001 71
	5	341.18	106.65	6.16	2.07	0.007 31	0.001 23	0.005 78	0.016 72
	平均值($n=2$)	184.46	62.23	5.41	1.37	0.004 43	0.001 48	0.004 36	0.009 22
林地	6	128.30	16.62	1.02	0.11	0.005 15	0.010 52	0.015 57	0.001 03
	7	882.42	137.37	3.40	0.73	0.003 27	0.004 43	0.015 62	0.000 04
	平均值($n=2$)	505.36	77.00	2.21	0.42	0.004 21	0.007 47	0.015 59	0.000 54
V 类标准			40	2	0.4	1	0.1	2	0.1

对于城市用地类型,二次降雨间隔是雨水径流污染物的主要影响因素。降雨事件2的二次降雨间隔达23 d,故其EMC平均值明显比较高,降雨事件3的降雨强度虽比降雨事件1大,但二次降雨间隔短(仅1 d),故污染物浓度差异不大。对比不同的城市用地,公路径流各项污染物平均浓度均高于庭院,主要是公路受人类商业活动与公路交通等的影响大。

不同土地利用类型的典型毒害物EMC均低于V类水标准。其中,公路径流重金属类污染物明显较其他用地类型高,主要是受车胎磨损、汽车尾气、道路老化等因素的影响,公路的典型毒害物流失也不容忽视。这与Lee J H^[18]、冯伟^[19]等的研究结果相符。

2.2 污染物与径流量相关性分析

雨水径流是非点源污染物输移的驱动因子及载体,城市地表径流量与非点源污染物存在明显的线性相关性^[20-21]。利用SPSS对城市用地与农业用地雨水径流的不同污染物平均值进行Pearson相关分析,见表4。结果表明,庭院、公路用地类型相关性好,除庭院TP相关系数稍低外(>0.65),污染物平均值与径流量显著正相关。农业用地类型中,菜地相关性显著(均大于0.8),但水田、林地小区径流污染物平均值与径流量未有显著相关性,与类似文献报道^[7]结论有出入。对其原因分析发现,水田径流场两次监测虽然降雨强度相同,但农作物处于不同生长周期,分别处于蓄水灌溉期与晒田干水期,下垫面特征明显不同,降雨所形成的地表径流量与污染量也差别较大。这也是导致同其他文献结果存在差异的主要原因。林地由于两次监测二次降雨间隔差别大,土壤水分饱和度差异明显,分析结果差异性也较大,但若对于单一场次降雨事件进行拟合,排除二次降雨间隔及下垫面部分特殊情形的干扰,其相关性显著。这表明二次降雨间隔与下垫面特性是非点源污染物浓度的主要影响因素。

2.3 初始冲刷特征分析

对比不同用地类型每场降雨的M(V)曲线图(图1)可知,庭院SS与COD发生显著初期冲刷现象,TN、TP与重金属则初期冲刷不显著,重金属在降雨后期发生二次初期冲刷现象^[22-23]。在其他研究中也存在类似的情况。总体来讲,对公路、菜地、水田、林地等下垫面,大部分指标都发生了明显的初期冲刷现象,部分指标在同一小区中出现不同的现象,或出现二次初期冲刷现象。这主要是由于受到降雨雨型的影响。

根据M(V)可以直观地定性描述初期冲刷现象,而初期冲刷比值 MFF_n 则可定量地表征初期冲刷的强弱程度,本研究对每次降雨事件的 MFF_{30} 按不同用地类型与污染物进行统计分析,以研究不同污染物和不同土地利用类型的初始冲刷现象的差别。

通过比较 MFF_{30} 平均值可确定各污染物指标初期现象的显著性,其统计结果显示各指标初期冲刷现象显著程度顺序为:SS>COD>Pb>TN>Zn>TP>Cu>As(图2)。总的来说,常规污染物要较重金属初期效应显著,大部分重金属的 MFF_{30} 变化范围较常规污染物广,表明重金属污染物的初期冲刷现象主要受不同用地类型的影响。

分析不同土地利用类型的 MFF_{30} 平均值(表5)可知,城市用地N、P污染物初期冲刷不显著。庭院由

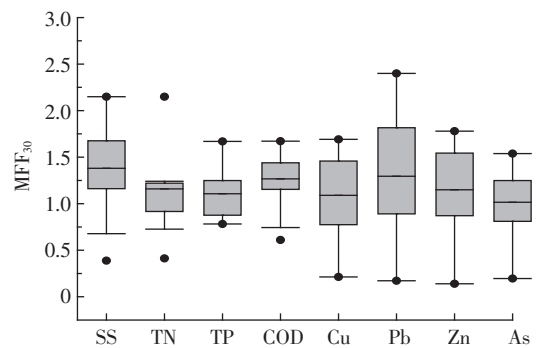


图2 不同污染物 MFF_{30} 值比较

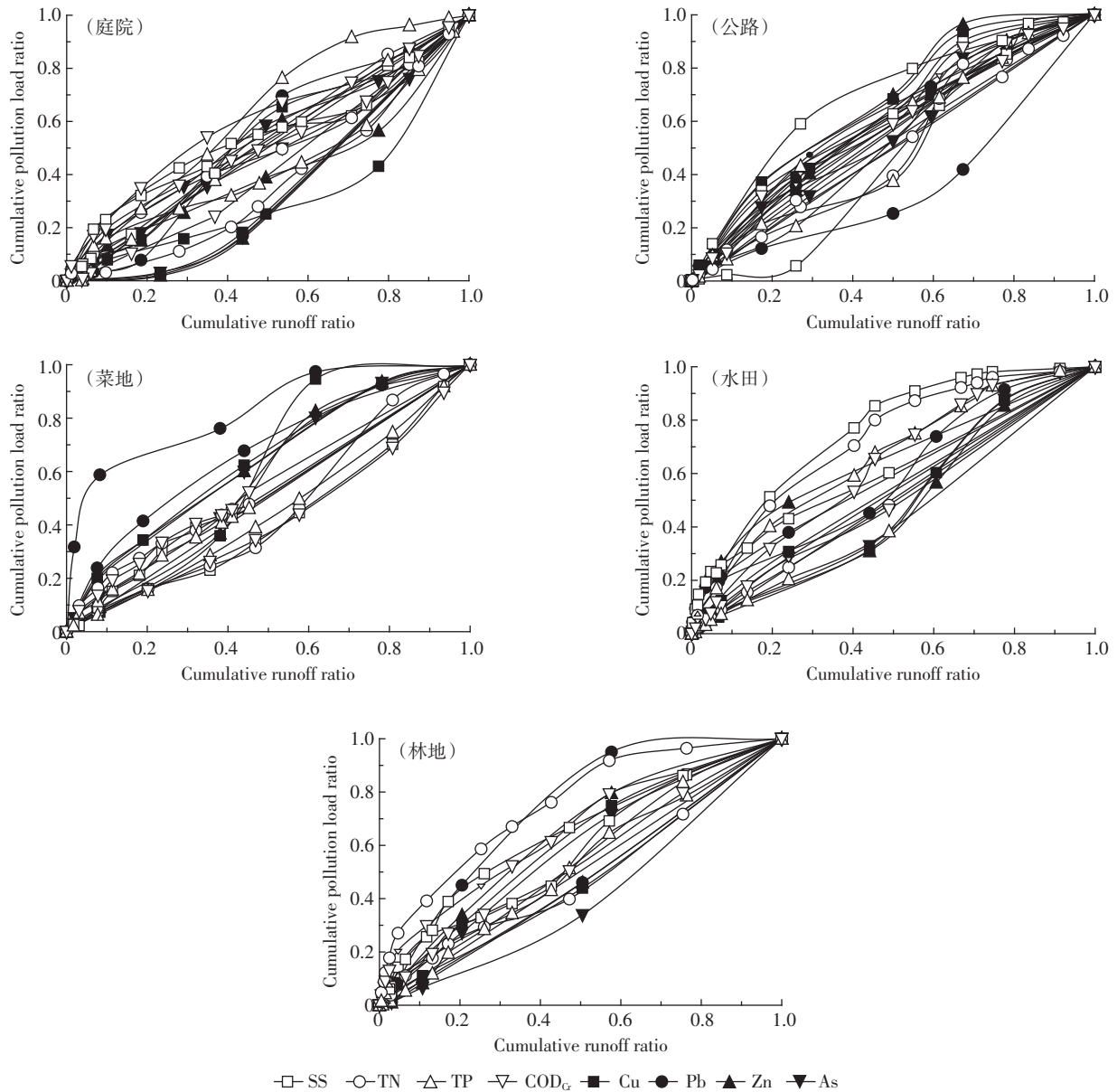
Figure 2 MFF_{30} of different pollutants

表4 污染负荷与径流量相关系数

Table 4 Pearson correlation coefficients between pollution loads and runoff flow under different land use types

用地类型	SS	TN	TP	COD _{Cr}	Cu	Pb	Zn	As
庭院	0.947**	0.847**	0.654*	0.930**	0.931**	0.935**	0.909**	0.887**
公路	0.916**	0.932**	0.886**	0.849**	0.800**	0.939**	0.952**	0.992**
菜地	0.954**	0.938**	0.957**	0.942**	0.947**	0.967**	0.895**	0.951**
水田	0.574	0.663*	0.783*	0.690*	0.765*	0.878**	0.954**	0.616*
林地	0.403	0.810**	0.885**	0.501	0.987**	0.943**	0.953**	0.956**

注:*表示 $P<0.05$,**表示 $P<0.01$ 。



□-SS ○-TN △-TP ▽-COD_{Cr} ■-Cu ●-Pb ▲-Zn ▼-As

图1 不同用地类型径流场降雨径流初期冲刷 M(V) 曲线

Figure 1 M(V) curves of first flush effect in different runoff plots

于清扫频率高,污染物本底值低,重金属初期冲刷不显著;公路则由于人类商业活动及道路交通的影响,背景值较高,具有明显的初期冲刷效应;农用地具有较为显著的初期冲刷现象,但其中菜地常规污染物 MF₃₀ 值不高。主要原因是降雨事件 1 的降雨强度为中雨,且雨量峰值出现在后期,所以降雨初期对地表的冲刷、侵蚀作用不明显。

为进一步研究初期冲刷现象的影响因素,本研究选取下垫面特性较为稳定的庭院、公路、菜地及林地为研究对象,分析 MF₃₀ 值与降雨特征进行 Pearson 相关分析(表 6)。上述结果表明,各项污染物与降雨

量、降雨强度及二次降雨间隔存在显著的相关关系,但与降雨历时的相关性却不显著。

3 结论

(1) 不同用地类型污染物排放规律差别较大,总体来说,农业用地水质较差,是流域主要非点源,但公路产生的重金属污染也不容忽视。庭院、公路、菜地小区污染物浓度与径流量相关性显著,水田、林地小区则相关性较差,主要是由二次降雨间隔与地表特性变化引起的。

(2) 庭院 SS 与 COD 发生显著初期冲刷现象,而

表5 不同用地类型 MFF₃₀ 平均值Table 5 Average MFF₃₀ values of different land use types

用地类型	SS	TN	TP	NO ₃ -N	NH ₄ ⁺ -N	COD	Cu	Pb	Zn	As
庭院	1.31	0.90	1.14	1.29	0.89	1.18	0.61	0.56	0.69	0.70
公路	1.34	1.00	1.10	1.02	1.05	1.42	1.54	1.18	1.45	1.20
菜地	0.96	0.98	0.95	0.99	1.31	1.01	1.22	1.11	1.22	1.34
水田	1.87	1.52	1.24	1.38	1.34	1.24	0.95	1.30	1.24	0.95
林地	1.49	1.60	1.09	1.21	1.59	1.15	1.15	1.39	1.22	0.95

表6 污染物 MFF₃₀ 值与降雨特征的相关性Table 6 Correlation coefficients between MFF₃₀ and rainfall characteristic parameters

降雨特征	SS	TN	TP	NO ₃ -N	NH ₄ ⁺ -N	COD	Cu	Pb	Zn	As
总降雨量	-0.006**	0.567**	-0.125**	-0.026**	0.406**	0.118**	0.124**	0.089**	0.245**	0.014**
降雨强度	-0.027**	0.441**	-0.048**	-0.104**	0.403**	0.083**	0.046**	0.107**	0.044**	-0.112**
降雨历时	-0.042**	0.523	-0.190	-0.026*	0.296	-0.020*	0.107	0.105	0.298	0.078
二次降雨间隔	0.404**	0.320**	0.270**	0.198**	0.339**	0.423**	0.202**	0.309**	0.388**	0.270**

注:*表示 $P < 0.05$, **表示 $P < 0.01$ 。

TN与TP与重金属则初期冲刷不显著,对于公路、菜地、水田、林地等,则大部分指标都发生了明显的初期冲刷现象,同时部分场次降雨中也会出现二次冲刷的现象。

(3)各污染物 MFF₃₀ 的大小顺序:SS>COD>Pb>TN>Zn>TP>Cu>As,常规污染物比重金属的初期效应更显著。对比不同用地类型发现,农用地发生初期冲刷现象更明显,但公路径流中重金属污染物也存在显著初期冲刷现象。降雨量、降雨强度及二次降雨间隔是影响初期冲刷现象的主要因素。

参考文献:

- [1] Taebi A, Droste R L. Pollution loads in urban runoff and sanitary wastewater[J]. *Science of the Total Environment*, 2004, 327: 175-184.
- [2] Arhonditsis G, Tsirtsis G, Annelidis M O. Quantification of the effects of non-point nutrient sources to coastal marine eutrophication: Amplification to a semi-enclosed gulf in the Mediterranean Sea[J]. *Ecological Modelling*, 2000, 129(2): 207-209.
- [3] US Environmental Protection Agency. Non-point source pollution from agriculture[EB]. <http://www.epa.gov/regions/water/nPs/nPsag.html>, 2003.
- [4] 胡远安,程声通,贾海峰.芦溪流域非点源污染物流失的一般规律[J]. *环境科学*, 2004, 25(6): 108-112.
HU Yuan-an, CHENG Sheng-tong, JIA Hai-feng. Regular pattern of non-point source pollutants losses in Luxi watershed[J]. *Environmental Science*, 2004, 25(6): 108-112.
- [5] 程红光,郝芳华,任希岩,等.不同降雨条件下非点源污染氮负荷入河系数研究[J]. *环境科学学报*, 2006, 26(3): 392-397
CHENG Hong-guang, HAO Fang-hua, REN Xi-yan, et al. The study of the rate loss of nitrogenous non-point source pollution loads in different precipitation levels[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2006, 26(3): 392-397.
- [6] Maniquiz M C, Lee S, Kim L H. Multiple linear regression models of urban runoff pollutant load and event mean concentration considering rainfall variables[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2010, 22(6): 946-952.
- [7] 李凯,曾凡棠,胡应成,等.广州番禺区不同地类的非点源污染排放特征[J]. *环境科学与技术*, 2013, 36(6): 26-31.
LI Kai, ZENG Fan-tang, HU Ying-cheng, et al. Characteristics of non-point source pollution discharge under different land use conditions in Panyu district of Guangzhou[J]. *Environmental Science & Technology*, 2013, 36(6): 26-31.
- [8] 丁志磊,祖艳群,陈建军,等.滇池流域2种坡耕地农林复合系统的地表径流、泥沙输出及径流N、P流失的特征[J]. *环境工程学报*, 2015, 9(11): 5301-5307.
DING Zhi-lei, ZU Yan-qun, CHEN Jian-jun, et al. Characteristics of surface runoff, sediment, N and P losses from two agro-forest plantation patterns in Dianchi Basin[J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2015, 9(11): 5301-5307.
- [9] 马东,杜志勇,吴娟,等.强降雨下农田径流中溶解态氮磷的输出特征[J]. *中国环境科学*, 2012, 32(7): 1228-1233.
MA Dong, DU Zhi-yong, WU Juan, et al. Characterization of dissolved nitrogen and phosphorus transportation in farmland runoff under heavy rain-taking Laoshan Reservoir watershed as an example[J]. *China Environmental Science*, 2012, 32(7): 1228-1233.
- [10] 胡博,赵剑强,陈莹,等.城市地表径流污染物浓度数学模型的建立及验证[J]. *环境科学学报*, 2015, 35(7): 2261-2268.
HU Bo, ZHAO Jian-qiang, CHEN Ying, et al. Establishment and verification of a novel mathematical model for pollutant concentrations in urban rainfall runoff[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2015, 35(7): 2261-2268.
- [11] 李颖,王康,周祖昊.基于SWAT模型的东北水稻灌区水文及

- 面源污染过程模拟[J]. 农业工程学报, 2014(7):42-53.
- LI Ying, WANG Kang, ZHOU Zu-hao. Simulation of drainage and agricultural non-point source pollutions transport processes in paddy irrigation district in North east China using SWAT [J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2014(7):42-53.
- [12] 刘洁, 陈晓宏, 肖志峰, 等. 东江流域土地利用变化对径流的影响分析[J]. 中山大学学报(自然科学版), 2015, 54(2):150-158.
- LIU Jie, CHEN Xiao-hong, XIAO Zhi-feng, et al. Assessing hydrological impact of land use change in the Dongjiang River basin[J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni (Natural Sciences Edition)*, 2015, 54(2):150-158.
- [13] 余晓飞, 和树庄, 胡斌, 等. 滇池柴河小流域暴雨径流中COD的输移特征研究[J]. 环境污染与防治, 2012, 34(10):61-70.
- YU Xiao-fei, HE Shu-zhuang, HU Bin, et al. Study on storm runoff of Chaihe reaches of Dianchi Lake[J]. *Environmental Pollution and Control*, 2012, 34(10):61-70.
- [14] Hunter H M, Walton R S. Land-use effects on fluxes of suspended sediment, nitrogen and phosphorus from a river catchment of the Great Barrier Reef, Australia[J]. *Journal of Hydrology*, 2008, 356:131-146.
- [15] Luo H B, Lin L, Gu H, et al. Total pollution effect of urban surface runoff[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2009, 21:1186-1193.
- [16] 刘康怀, 蓝俊康, 张力. 广西红壤系列土的分带及其环境地球化学特征[J]. 桂林工学院学报, 2000, 20(1):21-25.
- LIU Kang-huai, LAN Jun-kang, ZHANG Li. The zonation character of the series of red soils and their environment geochemical properties in Guangxi[J]. *Journal of Guilin Institute of Technology*, 2000, 20(1):21-25.
- [17] 庞宗强, 王晓, 李苗, 等. 徐州市沛沿河流域土壤保肥能力的实验研究[J]. 徐州工程学院学报(自然科学版), 2010, 25(2):61-66.
- PANG Zong-qiang, WANG Xiao, LI Miao, et al. Study of the capability of nutrients holding of soils in the Pei River Basin of Xuzhou[J]. *Journal of Xuzhou Institute of Technology(Natural Sciences Edition)*, 2010, 25(2):61-66.
- [18] Lee J H, Bang K W, Ketchum L H, et al. First flush analysis of urban storm runoff[J]. *Sci Total Environ*, 2002, 293:163-175.
- [19] 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, 2012, 6(3):817-822.
- FENG Wei, WANG Jian-long, CHE Wu, et al. Analysis on characteristics of stormwater runoff flush on different land surfaces[J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2012, 6(3):817-822.
- [20] Ma Z B, Ni H G, Zeng H, et al. Function formula for first flush analysis in mixed watersheds: A comparison of power and polynomial methods[J]. *Journal of Hydrology*, 2011(40):333-339.
- [21] 李子君, 于兴修. 冀北土石山区坡面尺度径流特征及其影响因素[J]. 农业工程学报, 2012, 28(17):109-116.
- LI Zi-jun, YU Xing-xiu. Characteristics of surface runoff and its influencing factors on slope scale in rocky mountain area of Northern Hebei Province[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering(Transactions of the CSAE)*, 2012, 28(17):109-116.
- [22] Flint K R, Davis A P. Pollutant mass flushing characterization of high-way storm-water runoff from an ultra-urban area[J]. *Journal of Environmental Engineering*, 2007, 133(6):616-626.
- [23] 傅大放, 石峻青, 李贺. 高速公路雨水径流重金属污染初期效应[J]. 环境科学学报, 2009, 29(8):1672-1677.
- FU Da-fang, SHI Jun-qing, LI He. First flush analysis of heavy metals in expressway storm water runoff[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2009, 29(8):1672-1677.