

DOI:10. 3880/j. issn. 1004 - 6933. 2018. 01. 02

广州市典型社区单元面源污染初期冲刷效应

黄国如^{1,2}, 曾家俊¹, 吴海春¹, 张明珠³

(1. 华南理工大学土木与交通学院, 广东 广州 510640; 2. 华南理工大学亚热带建筑科学国家重点实验室, 广东 广州 510640; 3. 广州市水务科学研究所, 广东 广州 510220)

摘要: 为了向初期雨水截留控制提供基础数据, 研究广州市社区单元面源污染初始冲刷效应, 采集并分析研究区域中3场降雨道路、屋顶和绿地径流的污染物情况, 利用无量纲累积曲线、初期冲刷系数及质量初期冲刷强度指数MFF对径流污染物BOD₅、COD_{Cr}、TSS、NH₃-N、TP、TN的初期冲刷效应进行定性分析和定量分析。结果表明, 绿地和屋顶比道路更易发生初期冲刷效应, 且冲刷强度一般比道路强, 而绿地在连续降雨后初期冲刷效应更加明显; 各种初期冲刷污染物中, TN初期冲刷效应更为显著, TP和NH₃-N次之; 采用MFF指数法可以得到较为可靠的定量化结果, 建议采用该方法作为初始冲刷效应分析方法。

关键词: 面源污染; 初期冲刷效应; 无量纲累积曲线; 初期冲刷系数; 质量初期冲刷强度指数

中图分类号: X522 **文献标志码:** A **文章编号:** 1004 - 6933 (2018) 01 - 0008 - 08

First flush effect of non-point source pollution in Guangzhou typical community unit

HUANG Guoru^{1, 2}, ZENG Jiajun¹, WU Haichun¹, ZHANG Mingzhu³

(1. School of Civil Engineering and Transportation, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China; 2. State Key Laboratory of Subtropical Building Science, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China; 3. Guangzhou Water Science Research Institute, Guangzhou 510220, China)

Abstract: In order to provide basic data for initial rainfall interception control, the first flush effect of non-point source pollution in Guangzhou community unit was studied in this paper. The runoff pollutants at road, roof and greenbelt during three rainfall events in the study area were collected and analyzed. The dimensionless cumulative curve, the first flush coefficient and MFF index were used respectively to do quantitative analysis and qualitative analysis of the first flush effect of runoff pollutants such as BOD₅, COD_{Cr}, TSS, NH₃-N, TP and TN. The results showed that the first flush at greenbelt and roof occurred more easily and had more intensity than that at road, and the first flush at greenbelt is more obvious after successive rains. Among the various pollutants in the first flush, the first flush effect of TN is more obvious, and TP and NH₃-N take the second place. The more reliable quantitative results can be obtained by the MFF index method, and it is recommended to be the analysis method of the first flush effect.

Key words: non-point source pollution; first flush effect; dimensionless cumulative curve; first flush coefficient; MFF index

基金项目: 广州市水务科技项目 (GZSW - 201401); 广州市科技计划项目 (201707020020); 广东省水利科技创新项目 (2016 - 32)
作者简介: 黄国如 (1969—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事水文水资源研究。E-mail: huanggr@scut.edu.cn

城市面源污染是指城市不同下垫面如道路、屋顶、绿地等在未降雨期间积累了一系列污染物,如盐分、油类、重金属、有机物、氮、磷及其他杂物,在降雨驱动下,随降雨形成的径流流入河流、湖泊等污染受纳水体^[1-3]。降雨具有随机性、广泛性、时间滞后性、无规律性等特点,城市降雨径流污染影响因素较多且污染物成分复杂。城市降雨径流污染初期冲刷效应研究是开展城市面源污染特征及其控制研究的重要基础。随着海绵城市建设的广泛推进,城市降雨径流污染初期冲刷效应越来越受到重视,但由于初期冲刷效应随机性较强,不同学者对初期冲刷效应定义及其评价标准仍有较大分歧。近年来国内外学者根据雨水径流量提出了质量初期冲刷概念(mass first flush, MFF)^[4-9],认为雨水径流初期污染物累积输送速率大于径流量累积输送速率,降雨初期占径流总量较小比例的雨水径流挟带了占该场次降雨污染负荷较大比例的污染物时发生初期冲刷效应。欧浪波等^[10]探讨了降雨特征对屋面径流中特定污染物初期冲刷效应的影响,并对比分析了不同屋面中不同程度的初期冲刷效应;Georgios 等^[11]在城市、郊区、校园等下垫面收集雨水并进行初期冲刷污染物分析,为雨水收集回收利用提供重要的参考数据;黄国如等^[12-13]在广州市开展初期冲刷效应研究,分析冲刷强度与降雨时间、降雨量、平均雨强等因素关系,为雨水径流水质改善提供参考。由于初期冲刷效应影响因素较多,笔者以广州市典型社区单元为例,分别采用污染物浓度无量纲累积曲线 $M(V)$ 、初期冲刷系数 b 及 MFF 指数等多种方法对各种污染物在不同下垫面情况下的初期冲刷效应进行综合分析,旨在为降雨径流污染初期雨水截留和控制提供参考。

1 研究区域概况

研究区域位于广州市荔湾区花地河以西、龙溪中路以北、广州环城高速以东的芳村高尔夫地块,2013 年该区域新建了几个小区,区域三面被河流围绕,是一个独立封闭的排水系统(图 1)。该区域用地主要由道路、广场、房屋、绿地等组成,总面积为 43.29 万 m^2 。研究区域属于亚热带海洋性季风气候区,雨量丰沛,多年平均降雨量为 1 675.5 mm。该区域排水口高程多在 $-0.5 \sim 1.0 \text{ m}$,汛期遇洪潮水位顶托,易引发“水浸街”现象。

2 采样与试验方法

在研究区域选取道路、屋顶、绿地 3 种典型下垫面,于降雨时自产流起每隔 10 min 在各下垫面收集



图 1 研究区域地理位置图

一次雨水径流样品,并记录每次采样时间,每次采集样品须装满 A、B、C 3 个瓶子,每个瓶子 500 mL,即第一个样品需用瓶 1A、1B、1C 装满,第二个样品用瓶 2A、2B、2C 装满,依次类推,若不是严格的间隔 10 min 采一次样,需及时记下每次采样时间。用于分析的不同类型下垫面雨水径流污染物类型主要为 BOD_5 、 COD_{Cr} 、TSS、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、TN、TP 等水质指标。由于 COD_{Cr} 、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、TN、TP 等指标值随着时间变化会有所改变,而采样点距离实验室较远,为避免上述指标变化,需在采完样后及时加入浓硫酸,使其保持与采样时相同的值,即在上述 A、B、C 瓶中的 C 瓶滴入浓硫酸,而 A、B 瓶分别用于测定 BOD_5 和 TSS。各指标检测方法见表 1。

表 1 各指标检测方法

检测项目	检测方法
BOD_5	稀释与接种法 HJ 505—2009
COD_{Cr}	重铬酸盐法 GB/T 11914—1989
TSS	重量法 GB/T 11901—1989
$\text{NH}_3\text{-N}$	纳氏试剂分光光度法 HJ 535—2009
TN	碱性过硫酸钾消解-紫外分光光度法 HJ 636—2012
TP	钼酸铵分光光度法 GB/T 11893—1989

于 2016 年 9 月共采集 20160902、20160907 和 20160910 共 3 场降雨径流样品,采集完后严格按上述方法尽快化验,并整理出样品中各污染物浓度的最大值 ρ_{max} 、中位数 ρ_{med} 、最小值 ρ_{min} 、平均值 $\bar{\rho}$ 、标准差 σ 和变异系数 C_v ,见表 2。由表 2 可以看出,各个污染物指标变化幅度较大,表现出较强的不确定性。需要说明的是,由于各种原因,20160902 场次降雨的绿地和 20160907 场次降雨的屋顶未收集到水样。

3 初期冲刷效应分析方法

早期对初期冲刷效应的理解仅停留在浓度初期冲刷(concentration first flush),认为雨水径流中污染物浓度随时间的延长而逐渐降低。该方法仅停留在表层,简单地认为前期污染物浓度高于后期,而忽视了降雨强度、径流量的影响。降雨强度越大,对地表的冲击强度越大,越容易将污染物从下垫面冲出转

表 2 52 个样品水质指标数据汇总

指标	$\rho_{\max}/$ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	$\rho_{\text{med}}/$ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	$\rho_{\min}/$ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	$\bar{\rho}/$ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	σ	C_e
BOD ₅	84.20	3.75	1.40	7.80	13.40	1.72
COD _{Cr}	393.00	16.50	5.00	33.80	63.20	1.87
TSS	132.00	8.50	1.00	19.80	30.10	1.52
NH ₃ -N	2.27	0.62	0.11	0.75	0.56	0.74
TN	3.96	2.46	1.35	2.43	0.68	0.28
TP	0.26	0.05	0.02	0.08	0.06	0.73

移至地表径流。相同降雨强度下,冲出的污染物总量相同,但当径流量较大时,径流浓度也会随之降低。所监测到的水质数据变化过程也说明污染物浓度并不总是随着持续时间延长而逐渐降低,故仅采用浓度初期冲刷分析难以准确描述初期冲刷现象。笔者结合无量纲累积曲线、初期冲刷系数 b 和 MFF 指数等,较为系统地分析初期冲刷现象。

3.1 无量纲累积曲线

随着国内外学者对雨水径流量考虑,又提出质量初期冲刷。笔者采用无量纲累积曲线 $M(V)$ 方法分析(式(1)),以该场次累积径流量与径流总量之比为横坐标,以污染物累积负荷与污染物负荷总量之比为纵坐标,绘制无量纲曲线图(图 2)。当 $M(V)$ 曲线的斜率大于 1,即在 45° 对角线之上时,表明污染物的累积输送速率大于径流量的累积输送速率,这时发生初期冲刷;反之,表明污染物的累积输送速率小于径流量的累积输送速率,不存在初期冲刷^[12,14]。

$$\frac{M(t)}{V(t)} = \frac{\int_0^t Q(t)\rho(t)dt / \int_0^T Q(t)\rho(t)dt}{\int_0^t Q(t)dt / \int_0^T Q(t)dt} \approx \frac{\sum_{i=0}^k \bar{Q}(t_i)\bar{\rho}(t_i)\Delta t / \sum_{i=0}^n \bar{Q}(t_i)\bar{\rho}(t_i)\Delta t}{\sum_{i=0}^k \bar{Q}(t_i)\Delta t / \sum_{i=0}^n \bar{Q}(t_i)\Delta t} \quad (1)$$

式中: $M(t)$ 为 t 时刻降雨过程排放的污染负荷量,mg; $V(t)$ 为 t 时刻降雨过程排放的径流量,L; $Q(t)$ 为 t 时刻的瞬时径流量,L/min; $\rho(t)$ 为 t 时刻的瞬时污染物浓度,mg/L; T 为从降雨产生径流开始至降雨径流结束持续时间,min; Δt 为计算时间间隔,min; $\bar{Q}(t_i)$ 为 t_i 时刻 Δt 计算时间段内径流量平均值,L/min; $\bar{\rho}(t_i)$ 为 t_i 时刻 Δt 计算时间段内污染物质量浓度平均值,mg/L。

式(1)中的径流量 $Q(t)$ 利用 GB 50014—2006《室外排水设计规范》中的雨水量推理公式法得到:

$$Q(t) = i(t)\psi F \quad (2)$$

式中: $i(t)$ 为降雨强度,mm/min; ψ 为径流系数; F

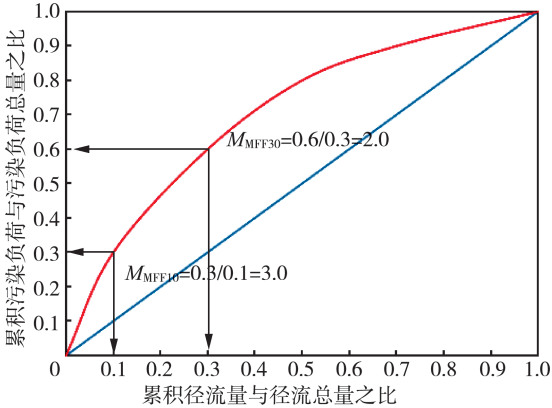


图 2 $M(V)$ 曲线和 MFF 指数示意图

为汇水面积, hm^2 。

3.2 初期冲刷系数

无量纲累积曲线 $M(V)$ 仅用于定性分析是否发生了初期冲刷。尽管也能根据 $M(V)$ 曲线与对角线的偏离程度来判断初期冲刷强度大小,但对于特殊情况,如某些部分偏离对角线较大,但有些部分偏离对角线较小,或前半部分在对角线以上而后半部分在对角线以下,则不能给出直观表述,故严格意义上无量纲累积曲线 $M(V)$ 难以用来判断初期冲刷强度大小。

为了定量分析初期冲刷强度,Bertrand 等^[15]发现累积污染负荷百分比 G 与累积径流量百分比 L 之间存在幂函数关系,即

$$G = L^b \quad (3)$$

式中: G 为累积污染负荷百分比,取值范围为 0 到 1; L 为累积径流量百分比,取值范围为 0 到 1,且 $L=0$ 时 $G=0$, $L=1$ 时 $G=1$; b 为初期冲刷系数, b 的大小反映初期冲刷强度大小。根据前文所述,当曲线在 45° 对角线的上方时,即认为发生了初期冲刷效应。对应到式(3),由于 G 和 L 的取值范围均为 0~1,故当曲线在 45° 对角线上方时,即 $G > L$, b 值应小于 1,且 b 值越小,初期冲刷强度越大。

初期冲刷系数 b 定量分析方法是从事体上对整个冲刷过程趋势进行判别,无法准确表达初期冲刷效应发生在降雨过程中的具体位置。为了便于分析初期冲刷强度,车伍等^[16]根据 b 值大小分 5 种情况

描述冲刷强弱: $b < 0.5$ 时,发生较强初期冲刷效应; $0.5 < b < 1$,则发生较弱初期冲刷效应; $b = 1$ 时,发生均匀冲刷; $1 < b < 1.5$,发生后期冲刷效应,但后期冲刷较弱; $b > 1.5$,则发生后后期冲刷效应,且后期冲刷较强。

3.3 MFF 指数法

在 2002 年, Ma 等^[17] 基于无量纲累积曲线 $M(V)$ 提出质量初期冲刷强度 MFF 指数,用于定量分析降雨径流初期冲刷效应强度。MFF 指数指当累积输送径流量占总径流量 $n\%$ 时,累积污染负荷占污染负荷总量百分比与累积径流量占径流总量百分比的比值,即

$$M_{MFFn} = \frac{\int_0^t Q(t)\rho(t) dt / \int_0^T Q(t)\rho(t) dt}{\int_0^t Q(t) dt / \int_0^T Q(t) dt} = \frac{\int_0^t Q(t)\rho(t) dt / M}{\int_0^t Q(t) dt / V} \tag{3}$$

式中: n 为从降雨产生径流开始至 t 时刻的累积径流量占总径流量的百分比,即 MFF 的指数点,取值范围为 0 到 1.0; $Q(t)$ 为 t 时刻的瞬时径流量, L/min; $\rho(t)$ 为 t 时刻的瞬时污染物质量浓度, mg/L; T 为从降雨产生径流开始至降雨径流结束的持续时间, min; M 为整个降雨过程中的污染负荷总量, mg; V 为整个降雨过程中排放的径流总量, L。

从 M_{MFFn} 定义可知,这是从无量纲累积曲线 $M(V)$ 衍生出来的计算方法,计算时还需结合 $M(V)$ 曲线(图 2),图 2 中的 $M_{MFF10} = 3.0$ 和 $M_{MFF30} = 2.0$,分别表示初期 10% 和初期 30% 的累积降雨径流量携带 30% 和 60% 的累积污染负荷。根据前文所述,当 $M(V)$ 曲线处于对角线上方时,即发生了初期冲刷效应;对应于 M_{MFFn} ,当 $M(V)$ 曲线处于对角线上方时, M_{MFFn} 值大于 1,故当 M_{MFFn} 大于 1 时即发生初期冲刷效应。

从整体考虑,根据曲线与 $M_{MFFn} = 1$ 的位置关系图判断是否发生初期冲刷效应,并比较其所发生的初期冲刷强度。当曲线在 $M_{MFFn} = 1$ 上方时,即认为发生初期冲刷效应,且 M_{MFFn} 值越大,初期冲刷强度越强;当曲线在 $M_{MFFn} = 1$ 下方时,即认为发生后期冲刷效应,且 M_{MFFn} 值越小,后期冲刷强度越强;当曲线与 $M_{MFFn} = 1$ 重合时,即认为发生均匀冲刷效应。

4 结果与分析

4.1 无量纲累积曲线

根据 GB 50014—2006《室外排水设计规范》,由

于采集雨水区域汇水面积较小,利用固定径流系数法,由降雨数据推求径流量,即径流量平均值 $\bar{Q}(t_i)$ 由式(5)得到:

$$\bar{Q}(t_i) = \bar{i}(t_i)\psi F \tag{5}$$

式中: $\bar{i}(t_i)$ 为 t_i 时刻 Δt 计算时间段内降雨强度平均值, mm/min; ψ 为径流系数; F 为汇水面积, hm^2 。

利用所测得的污染物浓度数据及雨量计监测的降雨数据绘制各污染物的无量纲累积曲线,见图 3,由图 3 可以判别各下垫面是否发生初期冲刷效应。

由图 3 可知, TN 指标在 3 场降雨过程中,道路、屋顶和绿地均发生了初期冲刷效应,表明 TN 污染物容易发生降雨初期冲刷。

在 20160902 降雨中,除 $\text{NH}_3\text{-N}$ 外,道路和屋顶的 5 个污染物指标均发生了初期冲刷效应;降雨记录显示 20160902 场次以前的降雨较少,污染物累积较多,可见,道路和屋顶容易发生初期冲刷效应,在经过 20160902、20160907 两场降雨之后,所累积的污染物被冲刷,相对累积较少,因此 20160910 场次降雨中,道路和屋顶的初期冲刷效应并不明显。在 20160910 场次降雨中,绿地的各污染物指标均发生了初期冲刷;雨水经过屋顶和道路后汇集到管道和绿地,以致雨水携带污染物进入绿地,因此,绿地上 20160910 场次降雨的初期冲刷效应比 20160907 场次降雨要明显,由此也可以看出,绿地对雨水地表径流有一定的过滤能力,对初期雨水径流水质改善有较好作用。

4.2 初期冲刷系数

利用 $G = CL^b$ (其中 C 为拟合常数)对所测水质数据进行幂函数回归拟合,以判定初期和后期冲刷效应的冲刷强度,结果见表 3,其中 R^2 为拟合可信度。由表 3 可知,拟合度 R^2 绝大多数在 0.93 以上,拟合度较高,误差较小,并以车伍等^[9] 提出的方法判定初期冲刷效应的冲刷强度。具体分析结果如下:

对于 BOD_5 而言,20160902 场次降雨的道路和屋顶、20160907 场次降雨绿地和 20160910 场次降雨绿地发生了初期冲刷效应,其中,20160902 场次降雨道路初期冲刷较强 ($b < 0.5$),其余初期冲刷较弱 ($0.5 < b < 1$),初期冲刷强度依次为:20160902 道路 > 20160910 绿地 > 20160902 屋顶 > 20160907 绿地。对于 COD_{Cr} 而言,20160902 场次降雨的道路和屋顶、20160910 场次降雨的屋顶和绿地发生了初期冲刷效应,初期冲刷强度均较弱 ($0.5 < b < 1$),初期冲刷强度依次为:20160910 绿地 > 20160902 道路 > 20160902 屋顶 > 20160910 屋顶。对于 TSS 而言,

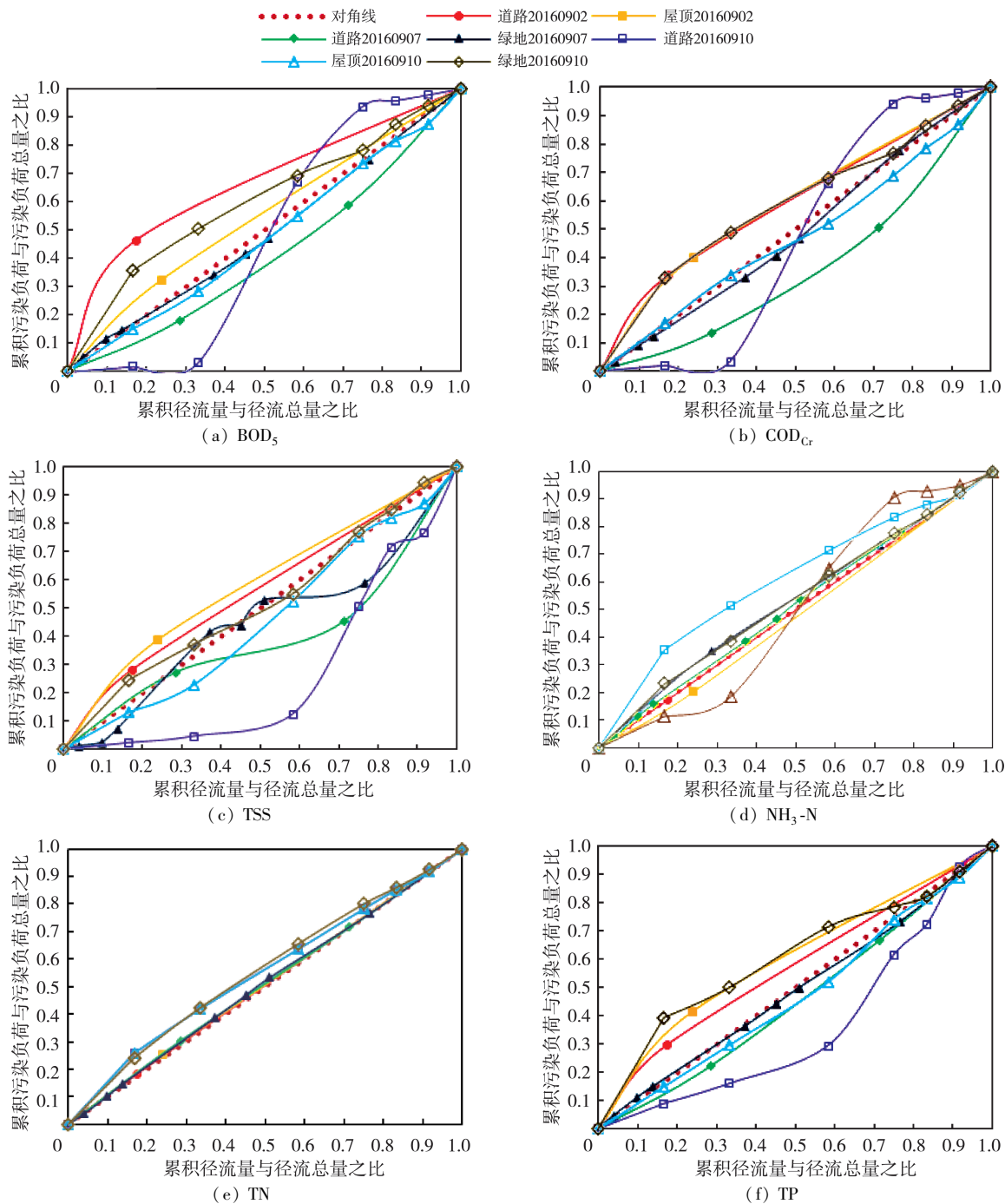


图3 各场次降雨径流不同污染物负荷无量纲累积曲线

20160902 场次降雨的道路和屋顶、20160907 场次降雨道路和 20160910 场次降雨绿地发生了初期冲刷效应,初期冲刷强度均较弱($0.5 < b < 1$),初期冲刷强度依次为:20160902 道路 > 20160902 屋顶 > 20160910 绿地 > 20160907 道路。对于 $\text{NH}_3\text{-N}$ 而言,20160907 场次降雨的道路和绿地、20160910 场次降雨的屋顶和绿地发生了初期冲刷效应,初期冲刷强度均较弱($0.5 < b < 1$),初期冲刷强度依次为:20160910 屋顶 > 20160910 绿地 > 20160907 道路 > 20160902 道路 > 20160907 绿地。对于 TN 而言,20160902 场次降雨的道路和屋顶、20160907 场次降雨道路、20160910 场次降雨的屋顶和绿地发生了初期冲刷效应,初期

冲刷强度均较弱($0.5 < b < 1$),初期冲刷强度依次为:20160910 屋顶 > 20160910 绿地 > 20160907 道路 > 20160902 屋顶 > 20160902 道路。对于 TP 而言,20160902 场次降雨的道路和屋顶、20160907 场次降雨绿地、20160910 场次降雨绿地发生了初期冲刷效应,20160910 场次降雨绿地初期冲刷较强($b < 0.5$),其余初期冲刷强度均较弱($0.5 < b < 1$),初期冲刷强度依次为:20160910 绿地 > 20160902 屋顶 > 20160902 道路 > 20160907 绿地。

综上分析,在所监测的 3 场降雨事件 3 种下垫面共计 7 组数据中(20160902 场次降雨绿地和 20160907 场次降雨屋顶未收集到水样),TN 水质指

表 3 初期冲刷系数 b

水质指标	降雨场次	道路		屋顶		绿地	
		b	R^2	b	R^2	b	R^2
BOD ₅	20160902	0.439 5	1	0.788 5	1	—	—
	20160907	1.348 3	0.997 9	—	—	0.908 6	0.995 6
	20160910	2.479 1	0.937 6	1.056 6	0.998 1	0.563 0	0.995 2
COD _{Cr}	20160902	0.622 2	1	0.639 3	1	—	—
	20160907	1.566 4	0.993 8	—	—	1.027 2	0.998 5
	20160910	2.479 1	0.937 6	0.959 0	0.996 6	0.563 0	0.995 2
TSS	20160902	0.665 0	1	0.725 5	—	—	—
	20160907	0.936 1	0.859 7	—	—	1.456 2	0.969 7
	20160910	2.109 2	0.941 5	1.153 3	0.991 0	0.782 1	0.986 2
NH ₃ -N	20160902	1.002 2	1	1.118 9	1	—	—
	20160907	0.831 7	0.999 0	—	—	0.972 4	0.998 5
	20160910	1.315 7	0.968 8	0.569 7	0.999 0	0.811 9	0.998 9
TN	20160902	0.971 5	1	0.962 1	1	—	—
	20160907	0.945 1	0.999 8	—	—	1.006 0	0.999 3
	20160910	1.241 9	0.995 7	0.747 2	0.999 0	0.791 8	0.999 9
TP	20160902	0.695 4	1	0.615 6	1	—	—
	20160907	1.200 3	1	—	—	0.926 2	0.999 2
	20160910	1.344 0	0.963 6	1.061 4	0.998 5	0.498 2	0.984 9

标中有 71.4% (5 组降雨数据)发生了初期冲刷效应,其余各项水质指标均有 57.1% (4 组降雨数据)发生了初期冲刷效应。道路 6 项水质指标 18 组数据中,44.4% (8 组降雨数据)发生了初期冲刷效应;屋顶 6 项水质指标 12 组数据中,66.7% (8 组降雨数据)发生了初期冲刷效应;绿地 6 项水质指标 12 组数据中,75% (9 组降雨数据)发生了初期冲刷效应。由于降雨过程中道路中车辆持续行驶,不断带来污染物,使道路污染物浓度较高,不易发生初期冲刷效应。相比而言,绿地由于其下垫面性质,较易发生初期冲刷效应,屋顶次之,道路最不容易发生初期冲刷效应。

4.3 MFF 指数

为了避免采用不同 n 值的结果不同,计算 3 场降雨道路、屋顶、绿地 3 种下垫面类型及 6 种水质指标的 M_{MFFn} 值,绘制 M_{MFFn} 随累积径流量比例变化曲线(图 4)。

由图 4 可知,对于 BOD₅而言,20160902 场次降雨的道路和屋顶、20160910 场次降雨绿地发生了初期冲刷效应,初期冲刷强度依次为:20160902 道路 > 20160910 绿地 > 20160902 屋顶。对于 COD_{Cr}而言,20160902 场次降雨的道路和屋顶、20160910 场次降雨绿地发生了初期冲刷效应,初期冲刷强度依次为:20160902 道路 > 20160902 屋顶 > 20160910 绿地。对于 TSS 而言,20160902 场次降雨的道路和屋顶、20160910 场次降雨绿地发生了初期冲刷效应,初期冲刷强度依次为:20160902 屋顶 > 20160902 道路 > 20160910 绿地。对于 NH₃-N 而言,20160907 场次降雨的道路和绿地、20160910 场次降雨的屋顶和绿

地发生了初期冲刷效应,初期冲刷强度依次为:20160910 屋顶 > 20160910 绿地 > 20160907 道路 > 20160907 绿地。对于 TN 而言,所有降雨场次均发生了初期冲刷效应,初期冲刷强度依次为:20160910 屋顶 ≈ 20160910 道路 > 20160910 绿地 > 20160907 道路 > 20160907 绿地 ≈ 20160902 道路 > 20160902 屋顶。对于 TP 而言,20160902 场次降雨的道路和屋顶、20160907 场次降雨绿地、20160910 场次降雨绿地发生了初期冲刷效应,20160910 绿地 > 20160902 屋顶 > 20160902 道路 > 20160907 绿地。综上分析,在所监测的 3 场降雨事件 3 种下垫面共计 7 组数据中(20160902 场次降雨绿地和 20160907 场次降雨屋顶未收集到水样),TN 水质指标中有 100% (7 组降雨数据)发生了初期冲刷效应,而 BOD₅、COD_{Cr}和 TSS 中均有 42.9% (3 组降雨数据)发生了初期冲刷效应,NH₃-N 和 TP 中均有 57.1% (4 组降雨数据)发生了初期冲刷效应。道路 6 项水质指标 18 组数据中,44.4% (8 组降雨数据)发生了初期冲刷效应;屋顶 6 项水质指标 12 组数据中,58.3% (7 组降雨数据)发生了初期冲刷效应;绿地 6 项水质指标 12 组数据中,75% (9 组降雨数据)发生了初期冲刷效应。

上述分别采用了各场次降雨径流不同污染物浓度无量纲累积曲线图、初期冲刷系数 b 及 MFF 指数等指标对各种污染物在道路、屋顶和绿地等下垫面情况下的初期冲刷效应进行了定性和定量分析,现将各种方法所得结果汇总于表 4。从表 4 可以看出,各种方法所得结果基本相同,但并不完全一致。

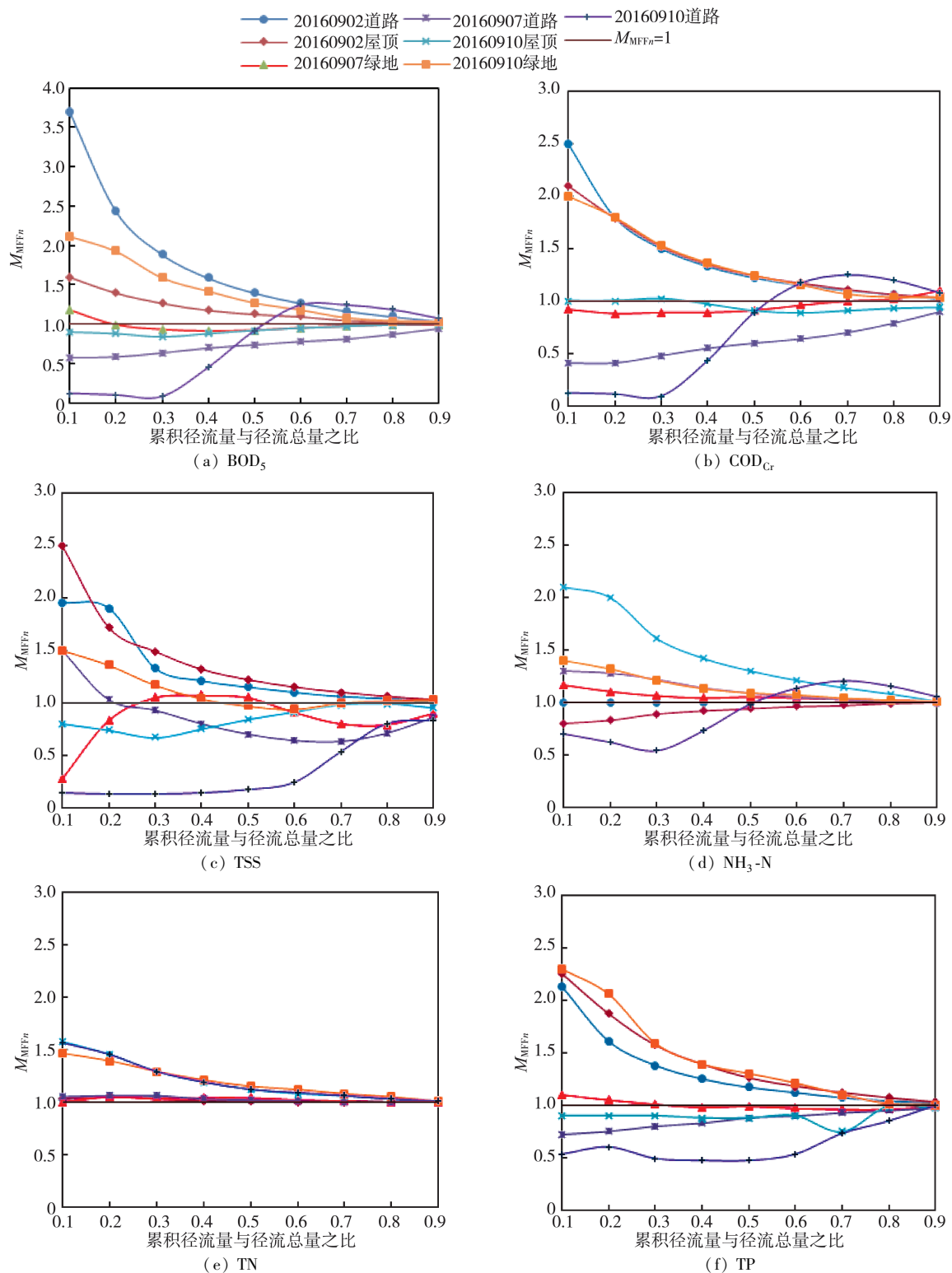


图4 各污染物 MFF 指数随累积径流量百分比变化过程

由于城市面源污染^[18]影响因素十分复杂,污染特征具有高度不确定性,初始冲刷受控于下垫面、最大降雨强度、降雨历时和雨前干燥天气期等因素影响^[12,19],因此,对于道路、屋顶和绿地等不同下垫面而言,同样一场暴雨所得到的初始冲刷效应不同,即使对于同样的下垫面,不同场次暴雨所得到的初始冲刷效应也不完全相同。由表4可知,无量纲累积曲线图法和 MFF 指数法所得结果完全一致,由于

MFF 指数法是在无量纲累积曲线图法基础上发展而来,该方法可以得到量化结果,较为合理、可靠,故采用 MFF 指数法所得结果作为最终结果。

5 结论

采用无量纲累积曲线、初期冲刷效应系数和 MFF 指数对 3 场次降雨不同下垫面的各种污染物进行定性和定量的初期冲刷分析,结果表明,绿地和

表 4 各种方法得到的初期冲刷效应判别结果

水质指标	降雨场次	道路			屋顶			绿地		
		$M(V)$ 曲线	系数 b	MFF 指数	$M(V)$ 曲线	系数 b	MFF 指数	$M(V)$ 曲线	系数 b	MFF 指数
BOD ₅	20160902	●	●	●	●	●	●	—	—	—
	20160907	○	○	○	—	—	—	○	●	○
	20160910	○	○	○	○	○	○	●	●	●
COD _{Cr}	20160902	●	●	●	●	●	●	—	—	—
	20160907	○	○	○	—	—	—	○	○	○
	20160910	○	○	○	○	●	○	●	●	●
TSS	20160902	●	●	●	●	●	●	—	—	—
	20160907	○	●	○	—	—	—	○	○	○
	20160910	○	○	○	○	○	○	●	●	●
NH ₃ -N	20160902	○	○	○	○	○	○	—	—	—
	20160907	●	●	●	—	—	—	●	●	●
	20160910	○	○	○	●	●	●	●	●	●
TN	20160902	●	●	●	●	●	●	—	—	—
	20160907	●	●	●	—	—	—	●	○	●
	20160910	●	○	●	●	●	●	●	●	●
TP	20160902	●	●	●	●	●	●	—	—	—
	20160907	○	○	○	—	—	—	●	●	●
	20160910	○	○	○	○	○	○	●	●	●

注：●表示发生初期冲刷效应，○表示未发生初期冲刷效应，—表示未收集到数据。

屋顶比道路更易发生初期冲刷,且冲刷强度一般比道路大,而绿地在连续降雨后初期冲刷效应更加明显,说明绿地对雨水地表径流有一定的过滤能力,对初期雨水径流水质改善有较好作用。各种初期冲刷污染物中,TN 初期冲刷效应更为明显,TP 和 NH₃-N 次之; $M(V)$ 曲线图法和 MFF 指数法所得结果完全一致,由于 MFF 指数法是在 $M(V)$ 曲线图法基础上发展而来,该方法可以得到量化结果,建议采用 MFF 指数法作为初始冲刷分析方法。

参考文献：

[1] 王宇翔,杨小丽,胡如幻,等. 常州市湖塘纺织工业园降雨径流污染负荷分析[J]. 水资源保护,2017,33(3): 68-73. (WANG Yuxiang, YANG Xiaoli, HU Ruhuan, et al. Analysis of rainfall-runoff pollution load of Hutang textile industrial park in Changzhou City [J]. Water Resources Protection,2017,33(3):68-73. (in Chinese))

[2] 窦月芹,吴涓,陈众,等. 合肥春季雨水径流污染过程及特征分析[J]. 水资源保护,2017,33(5):86-90. (DOU Yueqin, WU Juan, CHEN Zhong, et al. Spring rain runoff pollution process and its characteristics analysis in Hefei City [J]. Water Resources Protection, 2017, 33 (5) : 86-90. (in Chinese))

[3] 冯麒宇,胡海英,黄国如. 潭江泗合水流域降雨径流非点源污染特征分析[J]. 水资源保护,2016,32(3):143-148. (FENG Qiyu, HU Haiying, HUANG Guoru. Analysis of characteristics of non-point source pollution in rainfall-runoff process in Siheshui Watershed of Tanjiang Valley [J]. Water Resources Protection, 2016, 32 (3) : 143-148. (in Chinese))

[4] PENG H Q, LIU Y, WANG H W, et al. Event mean

concentration and first flush effect from different drainage systems and functional areas during storms [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2016, 23 (6) : 5390-5398.

[5] WU H, HUANG G, MENG Q, et al. Deep Tunnel for Regulating Combined Sewer Overflow Pollution and Flood Disaster: A Case Study in Guangzhou City, China [J]. Water, 2016, 8 (329) : 1-14.

[6] 陈莹,赵剑强,胡博,等. 西安市城市主干道路面径流初期冲刷效应[J]. 环境工程学报,2012,6(3):929-935. (CHEN Ying, ZHAO Jianqiang, HU Bo, et al. First flush effect of urban trunk road runoff in Xi'an [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2012, 6 (3) : 929-935. (in Chinese))

[7] 何强,王书敏,艾海男,等. 城市暴雨径流初期冲刷现象识别模式[J]. 环境科学学报,2011,31(11):2432-2439. (HE Qiang, WANG Shumin, AI Hainan, et al. A novel approach in assessing the first flush effect in urban stormwater runoff [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2011, 31 (11) : 2432-2439. (in Chinese))

[8] 刘勇华,高超,王登峰,等. 城市降雨径流污染初始冲刷效应对 BMPs 选择的启示[J]. 水资源保护,2009,25(6):29-32. (LIU Yonghua, GAO Chao, WANG Dengfeng, et al. First flush effect of urban storm water runoff pollution on implications for BMPs selection [J]. Water Resources Protection, 2009, 25 (6) : 29-32. (in Chinese))

[9] 车伍,张伟,李俊奇. 城市初期雨水和初期冲刷问题剖析[J]. 中国给水排水,2011,27(14):9-14. (CHE Wu, ZHANG Wei, LI Junqi. Analysis of urban initial rainwater and first flush [J]. China Water & Wastewater, 2011, 27 (14) : 9-14. (in Chinese))

(下转第 17 页)

类活动区,其治理和管控的任务更多,包括国土空间管控和产业布局的水资源承载能力管控、城市化及海绵城市建设(减少水文变异)、最严格水资源管理、点面源的污染防控及清洁生活生产方式、流域的水源涵养及水土保持,等等。总之,新视野更全面、系统、综合,真正体现大保护的理念,而不是传统狭义的单要素、离散式、低层次的保护。

4 新的治水理论

传统的治水更加强调工程技术,社会学、经济学、生态学、环境甚至地质学等自然科学的理论运用相对较少。要“构建生态廊道”,必须了解河湖的生态学规律,因此,生态学理论是新治水方略中的必修课。如从地质学角度看,水土流失包括自然侵蚀和人为加剧流失两个分量,水土保持重点是减少人为加剧流失的部分,而不是见到流失就当成问题来治理。没有自然的风化、侵蚀、搬运和沉积过程,肥沃的平原根本就不可能存在。而从水质角度看,很多

河流湖泊及地下水天然状况下某些化学物质浓度就很高,按照水质标准就是最差的,这又怎么治理?至于对社会学的阶层公平性、伦理学、涉水心理学、涉水法学等的考虑就更少。经济学的相关价值理论在治水中的运用也不充分,导致出现了很多闲置晒太阳的水利工程。新时代的治水是系统综合的,涉及的利益诉求复杂多样,因此所运用的理论要更丰富,是一种跨学科综合集成的理论体系。

水是不可替代的独特自然资源,是人与自然共生的基础和前提。保护水资源,修复水生态,是建设生态文明的重大任务和伟大工程,是中华民族永续发展的千年大计。今后我国在治水思路、理念、任务、体制等方面,要大胆改革创新,真正践行“绿水青山就是金山银山”的发展理念,争取到 21 世纪中叶,让我国河流湖泊变成自然健康的生态廊道、秀丽美观的风景线,成为绿色发展的高地。

(收稿日期:2017-11-23 编辑:彭桃英)

(上接第 15 页)

[10] 欧浪波,胡丹,黄晔,等. 北京城区屋面径流中 PAHs 的初期冲刷效应[J]. 环境科学,2011,32(10):2896-2903. (OU Langbo,HU Dan,HUANG Ye,et al. First flush analysis of pAHs in roof runoff in Beijing [J]. Environmental Science,2011,32(10):2896-2903. (in Chinese))

[11] GEORGIOS D,TSIHRINTZIS V A. Assessment of water quality of first-flush roof runoff and harvested rainwater [J]. Journal of Hydrology,2012,466-467(21):115-126.

[12] 黄国如,陈子宇. 广州校园区降雨径流污染的初期冲刷效应[J]. 华南理工大学学报(自然科学版),2013,41(12):29-35. (HUANG Guoru,CHEN Ziyu. First flush effect of urbanrainfall runoff pollution from campus in Guangzhou,China[J]. Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition),2013,41(12):29-35. (in Chinese))

[13] 黄国如,聂铁锋. 广州城区雨水径流非点源污染特性及污染负荷[J]. 华南理工大学学报(自然科学版),2012,40(2):142-148. (HUANG Guoru,NIE Tiefeng. Characteristics and load of non-point source pollution of urban rainfall runoff in Guangzhou,China[J]. Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition),2012,40(2):142-148. (in Chinese))

[14] GEIGER W. Flushing effects in combined sewer systems [C]//Proceedings of the 4th International Conference Urban Drainage. Lausanne: American Society of Civil Engineers,1987:40-46.

[15] BERTRAND K. J L,CHEBBO G,SAGET A. Distribution of pollutant mass vs volume in stormwater discharges and the first flush phenomenon [J]. Water Research,1998,32(8):2341-2356.

[16] 车伍,张鹏,张伟,等. 初期雨水与径流总量控制的关系及其应用分析[J]. 中国给水排水,2016,32(6):9-14. (CHE Wu,ZHANG Kun,ZHANG Wei,et al. Analysis of initial rainfall and total runoff volume control [J]. China Water & Wastewater,2016,32(6):9-14. (in Chinese))

[17] MA M,KHAN S,LI S,et al. First flush phenomena for highways: How it can be meaningfully defined [C]//Proceedings of the ninth International Conference on Urban Drainage. Porland, Oregon, USA. DOI: 10.1061/40644(2002)223.

[18] 白莹,阮晓红,李荣富,等. 南京市典型区域城市湿沉降污染成分特征分析[J]. 水资源保护,2013,29(5):10-14. (BAI Ying,RUAN Xiaohong,LI Rongfu,et al. Contaminant properties analysis of wet precipitation in typical urban areas in Nanjing City [J]. Water Resources Protection,2013,29(5):10-14. (in Chinese))

[19] 刘俊,尹洋洋,沙晓军,等. 下垫面要素变化对径流影响的多元统计分析[J]. 水资源保护,2016,32(2):41-43. (LIU Jun,YIN Yangyang,SHA Xiaojun,et al. Multivariate statistical analysis of influence of underlying surface change on runoff [J]. Water Resources Protection,2016,32(2):41-43. (in Chinese))

(收稿日期:2017-07-07 编辑:彭桃英)