

DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdtqk.2018.0156

肖洋, 王磊, 张涛涛, 等. 不透水表面坡度对溶解态污染物传输过程的影响研究[J]. 南水北调与水利科技, 2018, 16(6): 74-79.  
XIAO Y, WANG L, ZHANG T T, et al. Influence of slope on the dissolved pollutant transport process over impervious surface [J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2018, 16(6): 74-79. (in Chinese)

# 不透水表面坡度对溶解态污染物传输过程的影响研究

肖洋<sup>1,2</sup>, 王磊<sup>2</sup>, 张涛涛<sup>2</sup>, 冯雯<sup>2</sup>

(1. 河海大学 水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 南京 210098; 2. 河海大学 水利水电学院, 南京 210098)

**摘要:** 溶解态污染物是城市降雨径流污染的一个重要组成部分, 揭示其在降雨径流阶段的传输过程对于城市污水处理具有重要意义。采用人工模拟降雨实验研究了不透水表面不同坡度(0°、1°、2°、3°、4°、5°)情况下降雨径流及溶解态污染物传输过程。结果表明: 坡度越大, 坡面产汇流时间越短, 径流量越快达到稳定; 污染物浓度随降雨径流深度增加呈逐渐减小趋势, 坡度越大, 初始浓度越高, 衰减越快; 污染物传输速率呈先增大后减小的变化规律, 坡度越大, 污染物传输速率峰值越大, 峰值出现在径流深度为0.3~0.5 mm之间; 溶解态污染物传输过程符合指数冲刷模型, 随着坡度的增大, 冲刷系数 $k$ 先线性增加, 坡度大于3°基本保持稳定。相对于颗粒态污染物, 溶解态污染物冲刷系数大, 易被冲刷, 冲刷集中发生在径流初期。

**关键词:** 不透水表面; 降雨径流; 污染物传输; 溶解态污染物

中图分类号: TV 131 文献标志码: A 开放科学(资源服务)标识码(OSID):



## Influence of slope on the dissolved pollutant transport process over impervious surface

XIAO Yang<sup>1,2</sup>, WANG Lei<sup>2</sup>, ZHANG Taotao<sup>2</sup>, FENG Wen<sup>2</sup>

(1. State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

**Abstract:** Dissolved pollutants are an important part of urban rainfall runoff pollution. To reveal their transport process during the rainfall runoff stage is of great significance to urban wastewater treatment. In this study, we conducted a series of experiments to study the processes of rainfall-runoff and dissolved pollutant transport over impervious surface at different slopes (0°, 1°, 2°, 3°, 4°, 5°). The results showed that the higher the surface slope, the shorter the time of runoff yield and concentration, and the faster it took for the runoff volume to reach stability. The pollutant concentration would decrease as the rainfall runoff depth increased; the higher the slope, the higher the initial concentration, and the faster the attenuation. The pollutant transport rate would increase first and then decrease with time; the higher the slope, the larger the peak of pollutant transport rate. The peak of pollutant transport rate appeared when the cumulative runoff depth was 0.3 to 0.5 mm. The pollutant transport process conformed to the exponential wash-off model. The wash-off coefficient  $k$  would increase linearly first and then remain basically stable when the slope was above 3°. Compared with particulate pollutants, the dissolved pollutants had a larger wash-off coefficient and were more likely to be washed off, especially in the initial runoff stage.

**Key words:** impervious surface; rainfall runoff; pollutant transmission; dissolved pollutant

收稿日期: 2018-01-17 修回日期: 2018-09-30 网络出版时间: 2018-10-18

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20181012.1447.002.html>

基金项目: 国家重点研发计划(2016YFC0402605); 国家自然科学基金项目(51239003; 41323001); 江苏省第五期“333工程”培养资金资助项目(BRA2017371)

Funds: National Key Research and Development Program of China (2016YFC0402605); National Natural Science Foundation of China (51239003; 41323001); Fifth "333 Project" of Jiangsu Province (BRA2017371)

作者简介: 肖洋(1974), 男, 贵州铜仁人, 教授, 博士, 主要从事水力学及河流动力学研究。E-mail: sediment\_lab@hhu.edu.cn

随着城市化的快速发展,城市不透水面积急剧增加,一方面使得降雨产流时间缩短、洪峰流量增大、洪峰提前<sup>[1]</sup>,另一方面,雨水径流携带大量地表沉积物、营养污染物、重金属污染物等,汇入受纳水体,造成降雨径流污染,从而加重了城市水体的非点源污染问题<sup>[2,3]</sup>。因此,揭示城市降雨产汇流及污染物输移过程对于城市防洪和污染治理具有重要的科学意义。

鉴于降雨径流污染对城市水环境造成的严重危害,国内外研究者开展了大量研究,有基于不同城市特定的降雨事件过程中水质监测情况<sup>[4,8]</sup>,探究天然降雨条件下坡面污染物浓度变化规律;也有利用人工模拟降雨实验,建立和完善颗粒态污染物冲刷模型<sup>[9,13]</sup>,以及探究不同因素对坡面污染物传输过程的影响规律<sup>[14,17]</sup>。Metcalf 等<sup>[9]</sup>在人工模拟降雨实验条件下,提出了污染物传输速率与污染物的余量及单位面积径流量呈正相关关系的假设,由此建立了颗粒态污染物指数冲刷模型; Sartor 等<sup>[10]</sup>利用模拟降雨实验研究了不同粒径段颗粒态污染物的传输过程,对该指数冲刷模型进行了验证;考虑到降雨过程只能冲刷部分表面污染物, Egodawatta 等<sup>[11,12]</sup>引入了表示污染物传输能力大小的系数  $C_r$ , 对该模型进行了改进; Muthusamy 等<sup>[13]</sup>通过分析模拟降雨实验结果,认为冲刷能力系数  $C_r$  与冲刷系数  $k$  线性相关,进一步完善了指数冲刷模型。下垫面表面特性、污染物特性、雨强、坡度等因素均会对污染物的传输过程产生影响, Zhao 等<sup>[14]</sup>通过模拟降雨实验发现,表面粗糙度会对不同粒径的颗粒态污染物的冲刷产生影响;何流<sup>[15]</sup>和张超等<sup>[16]</sup>发现溶解态污染物较颗粒态污染物更容易被冲刷; Xiao 等<sup>[17]</sup>以 NaCl 模拟溶解态污染物,初步探究了雨强、表面粗糙度对传输过程的影响;根据 Egodawatta 等<sup>[11,12]</sup>的实验结果,路面和屋面情况下的污染物冲刷系数相差近 10 倍,表明坡度对污染物传输过程存在较大影响。由于颗粒态污染物在城市污染物中占较大比例,目前研究中大多集中在颗粒态污染物,而较少关注溶解态污染物<sup>[18]</sup>。只针对颗粒态污染物的雨水治理措施并不总是有效,且溶解态污染物与颗粒态污染物的理化特性存在较大差异<sup>[19]</sup>,前人所建指数冲刷模型是否适用于溶解态污染物仍需进一步研究。

为此,本文利用人工降雨实验研究不透水坡面坡度对降雨径流及溶解态污染物传输规律的影响,并探讨指数冲刷模型对溶解态污染物的适用性,建立不同坡度与溶解态污染物冲刷系数的关系,为城市防洪和水污染治理提供基础数据和科学支撑。

## 1 实验设计与数据采集

### 1.1 实验设计

实验在人工模拟降雨大厅内进行,见图 1(a),实验装置同文献[17]。选取长 2.96 m,宽 1.48 m,厚 0.02 m 的杉木板作为不透水坡面,见图 1(b),主要原因如下:(1)延续前期研究工作,保证实验的整体完整和连贯性;(2)实验中需频繁将模拟坡面从钢槽内取出以铺撒污染物,杉木板较为轻便且不易变形,便于搬运;(3)杉木板结构密实,不透水性好。为防止水流外溢,木板两侧及上端均装有 0.04 m 高的窄木条。溶解态污染物选用 NaCl 模拟<sup>[20]</sup>,实验前在木板上均匀划分  $5 \times 10$  个面积相同的单元格,用电子天平称取 50 组样品(2.5 g/组,总量 125 g)置于干燥整洁的塑料试管内,铺撒 NaCl 之前,提前润湿木板,以防止 NaCl 滚动和保证 NaCl 在降雨前充分溶解,再按 1 组/单元格的标准将 NaCl 缓慢均匀铺撒在每个单元格内,而后再把木板平缓的放入钢槽内。为研究坡度对溶解态污染物传输过程的影响,实验中坡度设为  $0^\circ$ 、 $1^\circ$ 、 $2^\circ$ 、 $3^\circ$ 、 $4^\circ$ 、 $5^\circ$ ,降雨强度选用中等雨强(40 mm/h),每组坡度进行 3 场重复实验,实验结果取平均值。为保证坡面污染物被充分冲刷,每场降雨时间持续 29 min。

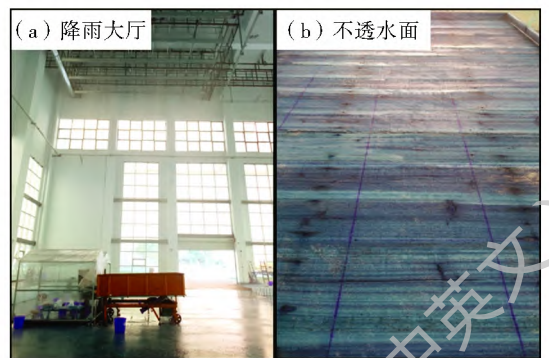


图 1 实验布置

Fig. 1 The graph of experimental set up

### 1.2 数据测量

参考 He 等<sup>[21]</sup>实验设计,产流后采样时间设置见表 1,时间由秒表记录。采样点位于坡面下边界出口处,流量  $Q$  (mL/s) 采用容量法测量,污染物浓度  $C$  (g/L) 通过电导仪测量样品电导率后转化得到(实验前先率定 NaCl 浓度与电导率关系)。

表 1 产流后采样时间设置

时间	0~ 2 min	2~ 29 min	> 29 min
采样时间/s	10	10	10
间隔时间/s	20	30	20

## 2 结果分析

### 2.1 径流

令  $Q^* = Q_i/IA$ , 对流量进行归一化处理以消除实测雨强的差异对流量变化过程的影响, 可得到降雨过程中相对流量变化过程(图 2)。依据相对流量的变化情况可将该过程分为三个阶段, 即径流初期、稳定期、下降期。不同坡度下流量进入稳定期的时刻为 1~ 4 min 不等(见表 2), 坡度越大, 相对流量越大且到达稳定期所需时间越短, 这主要是由于坡度的增加使得水流自身重力沿坡面方向的分力加大, 水流流速增大, 产汇流时间缩短, 相对流量也越快达到稳定。

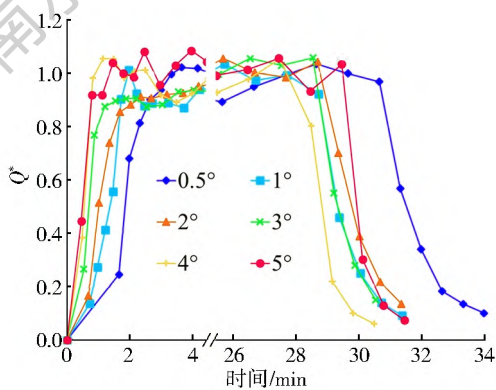


图 2 相对流量变化过程

Fig. 2 The relative runoff rate change process

表 2 不同坡度下降雨特征参数

Tab. 2 The rainfall characteristic parameters of different slopes

坡度(°)	0.5	1	2	3	4	5
实测雨强 $I/(mm \cdot min^{-1})$	0.838	0.733	0.655	0.698	0.705	0.817
进入稳定期时刻/min	3.65	2.72	2.69	1.54	1.49	1.12
进入稳定期时径流深/mm	1.70	1.09	1.08	0.65	0.82	0.62

为准确反映坡面实际降雨径流情况, 本文采用有效降雨径流深度  $H_t$  代替实际降雨深度<sup>[22]</sup>, 定义为:

$$H_t = \frac{\sum_1^i Q_i \Delta t_i}{A} \quad (1)$$

式中:  $Q_i$  为第  $i$  次采样流量( $mL/min$ );  $\Delta t_i$  为第  $i$  次采样时间间隔( $min$ );  $A$  为木板面积( $m^2$ )。

图 3 为不同坡度下径流深度变化过程, 由图可见, 径流初期、稳定期和下降期三个阶段所对应的径流深度变化规律也有所不同, 进入稳定期时刻及对应径流深度见表 2。在径流初期, 不同坡度下流量较小, 径流深度缓慢上升; 在稳定期, 流量基本保持恒定, 径流深度随降雨时间的增加呈线性增大; 下降期各坡度下径流深度逐渐趋于稳定。图中稳定阶段

曲线斜率表示雨强大小, 各坡度下斜率不同主要是由于不同坡度下实测雨强差异造成的(见表 2)。

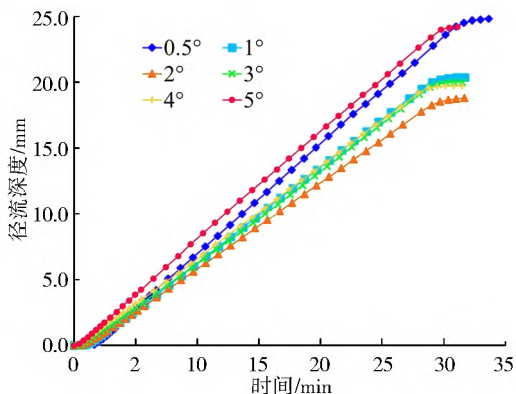


图 3 不同坡度下径流深度变化过程

Fig. 3 The accumulate runoff depth change process

### 2.2 污染物浓度

图 4 为不同坡度下污染物浓度变化过程, 整体上不同坡度下污染物浓度变化规律大致相似, 符合指数型变化趋势, 即降雨开始后, 污染物浓度较高并急剧下降, 初期冲刷效应较为明显; 随着降雨的持续, 污染物浓度下降速率逐渐减小, 最终趋于 0。其中, 径流深度在 0~ 0.75 mm 内, 坡度越大, 初始浓度越高, 浓度值下降也越快, 这可能是由于在大坡度情况下, 径流流速较大、流量增加速度快, 在开始阶段污染物相对充足的条件下, 降雨径流所携带的污染物也更多, 并且径流深度在 0~ 0.5 mm 内, 4° 和 5° 下的污染物浓度明显高于其他坡度情况, 可能是由于此时坡度超过一定的临界值, 产汇流过程急剧加快, 导致在坡面出口采集到浓度较高的样品; 坡度较小时, 产汇流较慢, 保留在坡面上的雨水量较多, 会一定程度上稀释坡面流中污染物的浓度, 所以在坡面出口会收集到浓度相对较低的样品。在 0.75 mm 后, 受污染物总量的限制, 坡度越大, 对应坡面上污染物剩余量越少, 径流中污染物浓度降幅也越大。

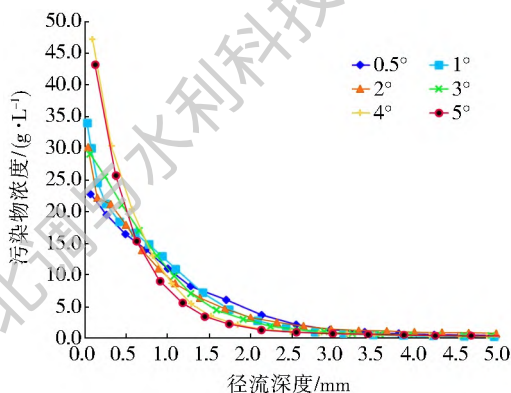


图 4 不同坡度下污染物浓度变化过程

Fig. 4 The pollutant concentration change process

## 2.3 污染物传输速率

污染物传输速率指单位时间内污染物的传输量,直接反映污染物传输的快慢。不同坡度下污染物传输速率随降雨径流深度的变化见图 5,由图可以看出,污染物传输速率呈先增加后减小的变化趋势。采样开始后,传输速率快速增加至最大值,且坡度越大,峰值越大,传输速率也越大,传输速率的峰值出现在径流深度为 0.3~0.5 mm 之间,到达峰值之后,传输速率逐渐下降至较低水平并缓慢趋于 0。从图 5 中还可以看出,与其他坡度情况下对比,4°和 5°下的传输速率峰值明显较高;主要由于在峰值出现阶段,不同坡度间流量差异较小,但 4°和 5°情况下的浓度明显高于其他坡度情况,高浓度意味着径流中携带了更多的污染物,所以其对应的污染物传输速率也较高。后期,坡面污染物剩余量越来越少,污染物传输速率缓慢下降,最终趋于 0。

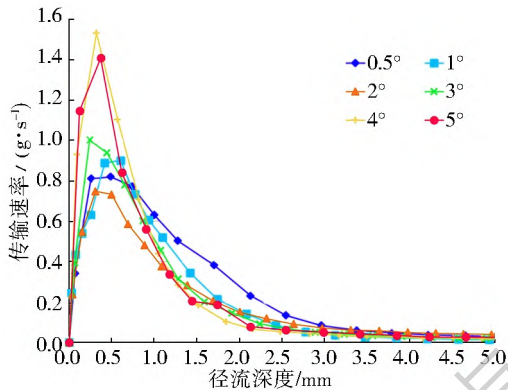


图 5 污染物传输速率随降雨径流深度的变化

Fig. 5 The pollutant transmission rate varies with runoff depth

## 2.4 污染物冲刷比例

指数冲刷模型<sup>10)</sup>是描述颗粒态污染物降雨冲刷过程应用最广泛的模型,表达式为

$$W_t = W_0(1 - e^{-kt}) \quad (2)$$

式中:  $W_0$  为初始污染物含量(g);  $W_t$  为  $t$  时刻累积冲刷量(g);  $I$  为降雨强度(mm/min);  $k$  为冲刷系数( $\text{mm}^{-1}$ );  $t$  为降雨时间(min)。

令:

$$F_{w_t} = \frac{W_t}{W_0} \quad (3)$$

式中:  $F_{w_t}$  为  $t$  时刻污染物累积冲刷比例。

由式(2)和(3)得:

$$F_{w_t} = (1 - e^{-kt}) \quad (4)$$

利用该式对不同坡度下的降雨实验结果进行拟合,式中  $I$  选用实测雨强,不同坡度下的拟合公式、冲刷系数及  $R^2$  值见表 3,所有坡度下的  $R^2$  均超过 0.96。图 6 展示了不同坡度下的实测数据及其模型

计算结果,从中可以看出模型拟合程度较好,表明溶解态污染物传输过程也可以用指数冲刷模型来描述。

表 3 不同坡度拟合结果

Tab. 3 The fitting results of different slopes

坡度(°)	拟合公式	$k / \text{mm}^{-1}$	$R^2$
0.5	$F_{w_t} = 1 - e^{-0.2909t}$	0.3471	0.9779
1	$F_{w_t} = 1 - e^{-0.4182t}$	0.5705	0.9661
2	$F_{w_t} = 1 - e^{-0.5172t}$	0.7896	0.9803
3	$F_{w_t} = 1 - e^{-0.6944t}$	0.9949	0.9605
4	$F_{w_t} = 1 - e^{-0.7037t}$	0.9982	0.9608
5	$F_{w_t} = 1 - e^{-0.8231t}$	1.0075	0.9610

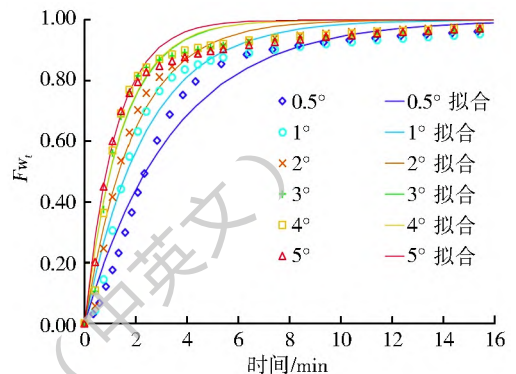


图 6 污染物冲刷比例

Fig. 6 The cumulative wash-off ratio of pollutants

根据拟合结果,得到不同坡度与冲刷系数  $k$  的关系见图 7,可以看出,在  $0.5^\circ \sim 3^\circ$  小坡度范围内,  $k$  随着坡度的变化趋势较为明显,坡度越大对应的  $k$  也越大,而在  $3^\circ \sim 5^\circ$  较大坡度时,  $k$  值变化不大,基本保持相对稳定。这可能是由于随着坡度增大,坡面降雨径流过程之间的差异减小(如图 3 所示),而污染物传输过程又与径流过程紧密相关,因此大坡度条件下溶解态污染物传输过程之间差异也随之减小。从表 3 拟合公式及图 6 可以看出,同一时刻大坡度情况下污染物的累积冲刷比例明显高于小坡度,尤其在径流初期阶段;但大坡度下的冲刷比例曲线的差异明显小于低坡度情况,由公式(4)可知,在实测雨强相近的情况下,冲刷比例曲线主要受冲刷系数  $k$  的影响,而大坡度下的  $k$  基本保持稳定,所以导致对应的冲刷比例曲线间的差异较小。有研究表明  $k$  的取值与污染物类型、雨强、水域面积及坡度等因素有关<sup>[23-25]</sup>。Egodawatta 等<sup>[11-12]</sup>研究颗粒态污染物冲刷规律时发现,路面和屋面两种下垫面情况下的冲刷系数分别为  $8.0 \times 10^4 \text{ mm}^{-1}$  和  $9.33 \times 10^3 \text{ mm}^{-1}$ ,远小于溶解态污染物的冲刷系数,这可能是由于颗粒态与溶解态污染物自身理化特性差异较大导致的,与颗粒态污染物相比,溶解态污染物只要水流流动就可传输,而颗粒态污染物的传输需要满

足一定的水动力条件,因此溶解态污染物的冲刷过程要远比颗粒态的容易,这也就导致了溶解态污染物的冲刷系数要远大于颗粒态污染物。

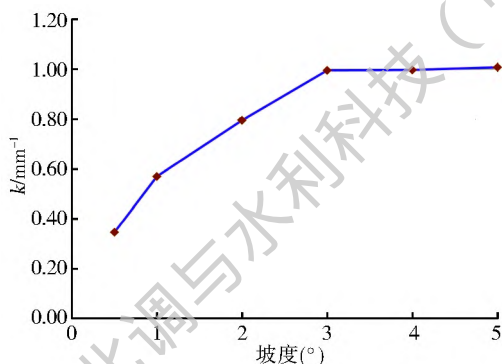


图 7 冲刷系数  $k$  随坡度变化关系

Fig. 7 The relationship between wash-off coefficient and slope

### 3 结论

本文通过模拟降雨实验,研究坡度变化对降雨径流和溶解态污染物传输过程的影响,并用指数冲刷模型对溶解态污染物传输过程进行拟合,得到主要结论如下。

(1) 不同坡度下径流量达到稳定阶段的时间存在差异,坡度越大,坡面产汇流时间越短,流量越快达到稳定。

(2) 污染物浓度随径流深度增加先显著下降,再缓慢下降,并逐渐趋近于 0,且坡度越大,初始浓度越高,污染物浓度下降越快。

(3) 污染物传输速率呈现先上升再下降的变化过程,坡度越大,污染物传输速率峰值越大,传输速率的峰值出现在径流深度为 0.3~0.5 mm 之间。

(4) 本实验范围内的污染物传输过程符合指数冲刷模型,坡度小于  $3^\circ$  时,冲刷系数  $k$  随着坡度增加线性增大,坡度超过  $3^\circ$  后, $k$  值基本保持稳定。由于溶解态污染物易于冲刷,其冲刷系数远大于颗粒态污染物。

#### 参考文献(References):

[1] 李丽娟,姜德娟,李九一,等.土地利用/覆被变化的水文效应研究进展[J].自然资源学报,2007,22(2):211-224.(LI L J,JIANG D J,LI J Y,et al.Advances in hydrological response to land use/land cover change[J].Journal of Natural Resources,2007,22(2):211-224.(in Chinese))

[2] LI L Q,YIN C Q,HE Q C,et al.Contribution of pollution load of storm runoff in urban areas of Hanyang,Wuhan City on the receiving water[J].China Environmental Science,2007,27(3):312-316.

[3] WEI Q S,ZHU G F,WU P,et al.Distributions of typical contaminant species in urban short-term storm runoff and their

fates during rain events: A case of Xiamen city[J].Journal of Environmental Sciences,2010,22(4):533-539.DOE:10.1016/S1001-0742(09)60138-8.

[4] 任玉芬,王效科,韩冰,等.城市不同下垫面的降雨径流污染[J].生态学报,2005,25(12):3225-3230.(REN Y F,WANG X K,HAN B,et al.Chemical analysis on stormwater runoff pollution of different underlying urban surfaces[J].Acta Ecologica Sinica,2005,25(12):3225-3230.(in Chinese))

[5] 李立青,尹澄清,孔玲莉,等.2次降雨间隔时间对城市地表径流污染负荷的影响[J].环境科学,2007,28(10):2287-2293.(LI L Q,YIN C Q,KONG L L,et al.Effect of antecedent dry weather period on urban storm runoff pollution load[J].Environmental Science,2007,28(10):2287-2293.(in Chinese)).DOI:10.13227/j.hjcx.2007.10.022.

[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 Y,ZHAO J Q,HU B,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] ALIAS N,LIU A,EGODAWATTA P,et al.Sectional analysis of the pollutant wash-off process based on runoff hydrograph[J].Journal of Environmental Management,2014,134(134C):63-69.DOE:10.1016/j.jenvman.2013.12.034.

[8] 刘雨童,李田,彭航宇.城市典型不透水下垫面径流中邻苯二甲酸酯的污染特征[J].环境科学,2018,11:1-13.(LIU Y T,LI T,PENG H Y.Characteristic of phthalic acid esters pollution in urban surface runoff in Shanghai,China[J].Environmental Science,2018,11:1-13.(in Chinese)).DOE:10.13227/j.hjcx.201803009.

[9] Metcalf and Eddy Inc.,University of Florida,Water Resources Engineers Inc.Storm Water Management Model,volume 1: final report[R].Washington,D.C.:Environmental Protection Agency,1971.

[10] SARTOR J D,Boyd G B,AGARDY F J.Water pollution aspects of street surface contaminants[J].Journal Water Pollution Control Federation,1974,46(3):458-467.

[11] EGODAWATTA P,THOMAS E,GOONETILLEKE A.Mathematical interpretation of pollutant wash-off from urban road surfaces using simulated rainfall[J].Water Research,2007,41(13):3025-3031.DOE:10.1016/j.watres.2007.03.037.

[12] EGODAWATTA P,THOMAS E,GOONETILLEKE A.Understanding the physical processes of pollutant build-up and wash-off on roof surfaces[J].Science of the environment,2009,407(6):1834-1841.DOE:10.1016/j.scitotenv.2008.12.027.

[13] MUTHUSAMY M,TAIT S,SHELLART A,et al.Improving understanding of the underlying physical process of sediment wash-off from urban road surfaces[J].Journal of Hydrology,2018,557:426-433.DOE:10.1016/j.jhydrol.2017.11.047.

[14] ZHAO H T,JIANG Q,XIE W X,et al.Role of urban surface roughness in road deposited sediment build-up and wash-off[J].Journal of Hydrology,2018,560:75-85.DOE:10.1016/

- j. hydro. 2018. 03. 016.
- [15] 何流. 人工降雨模拟地表污染物冲刷规律及初期效应分析[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2011. (HE L. Research on surface contaminant washoff rule and the first flush effect with artificial rainfall simulation [D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2011. (in Chinese))
- [16] 张超, 姜应和, 金建华, 等. 不同下垫面径流污染物冲刷规律研究[J]. 武汉理工大学学报, 2012, 34(08): 128-132. (ZHANG C, JIANG Y H, JIN J H, et al. Study on rainwater pollutant washoff rate in different underlying surface [J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2012, 34(08): 128-132. (in Chinese)). DOI: 10.3963/j.issn.1674-4431.2012.08.025.
- [17] XIAO Y, ZHANG T T, LIANG D F, et al. Experimental study of water and dissolved pollutant runoffs on impervious surfaces [J]. Journal of hydrodynamics, 2016, 28(1): 162-165. DOI: 10.1016/S1001-6058(16)60617-0.
- [18] SANSALONE J J, KORAN J M, SMITHSON J A, et al. Physical characteristics of urban roadway solids transported during rain events [J]. Journal of Environmental Engineering, ASCE, 1998, 124(4): 427-440. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9372(1998)124:5(427).
- [19] SHENG Y, YING G, SANSALONE J. Differentiation of transport for particulate and dissolved water chemistry load indices in rainfall runoff from urban source area watersheds [J]. Journal of Hydrology, 2008, 361(1-2): 144-158. DOI: 10.1016/j.jhydro.2008.07.039.
- [20] DENG Z Q, LIMA J L M P D, SINGH V P. Transport rate based model for overland flow and solute transport: Parameter estimation and process simulation [J]. Journal of Hydrology, 2005, 315(1): 220-235. DOI: 10.1016/j.jhydro.2005.03.042.
- [21] HE Z G, WENG H X, HO H C, et al. Soil erosion and pollutant transport during rainfall runoff processes [J]. Water Resources, 2014, 41(5): 604-611. DOI: 10.1134/S0097807814050170.
- [22] 王宝山, 黄廷林, 聂小保, 等. 不透水表面雨水径流污染物冲刷规律研究 [J]. 环境工程学报, 2010, 4(09): 1950-1954. (WANG B S, HUANG T L, NIE X B, et al. Study on rainwater pollutant washoff rate in impervious surface [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2010, 4(09): 1950-1954. (in Chinese))
- [23] ALLEY W M, SMITH P E. Estimation of accumulation parameters for urban runoff quality modeling [J]. Water Resources Research, 1981, 17(6): 1657-1664. DOI: 10.1029/WR017i006p01657.
- [24] ALLEY W M. Estimation of impervious area washoff parameters [J]. Water Resources Research, 1981, 17(4): 1161-1166. DOI: 10.1029/WR017i004p01161.
- [25] MILLAR R G. Analytical determination of pollutant washoff parameters [J]. Journal of Environmental Engineering, 1999, 125(10): 989-992. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9372(1999)125:10(989).

(上接第 67 页)

- [21] 丁华龙, 肖卫国, 陈晓宏, 等. 滨河流域降水时空演变规律分析 [J]. 水文, 2014, 34(5): 67-74. (DING H L, XIAO W G, CHEN X H, et al. Analysis of precipitation change trend in Binjiang River Basin [J]. Journal of China Hydrology, 2014, 34(5): 67-74. (in Chinese)) DOI: 1009-0852(2014)05-0067-08.
- [22] 李钦伟, 张端梅. 吉林省九台市作物生育期降水量特征分析 [J]. 吉林水利, 2014(1): 48251. (LI Q W, ZHANG D M. Analysis of characteristics of precipitation of crop growth period in jiutai city, Jilin province [J]. Jilin Water Resources, 2014(1): 48251. (in Chinese)) DOI: 10.15920/j.cnki.22-1179/tv.2014.01.001.
- [23] 王文圣, 丁晶, 李跃清. 水文小波分析 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2005. (WANG W S, DING J, LI Y Q. Hydrological wavelet analysis [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2005. (in Chinese))
- [24] 胡建桥, 刘万锋, 常周梅, 等. 兰州市 1951—2015 年降水量变化特征研究 [J]. 水利水电技术, 2017, 48(4): 8-12. (HU J Q, LIU W F, CHANG Z M, et al. Study on variation characteristics of precipitation in Lanzhou from 1951 to 2015 [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2017, 48(4): 8-12. (in Chinese)) DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2017.04.002.
- [25] 马吉巍, 郭翔宇, 付强, 等. 佳木斯市近 60 年降水量演变规律分析 [J]. 南水北调与水利科技, 2015, 13(1): 6-9. (MA J W, GUO X Y, FU Q, et al. Variation rule of precipitation in Jiamusi City in recent 60 years [J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2015, 13(1): 6-9. (in Chinese)) DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdkq.2015.01.002.
- [26] 王晓琳. 基于小波分析的邯郸山区水文特性分析与预测 [D]. 邯郸: 河北工程大学, 2012. (WANG X L. The analysis and prediction of hydrological characteristics based on Wavelet Analysis in Handan mountain area [D]. Handan: Hebei University of Engineering, 2012. (in Chinese))
- [27] 肖鹏. 洞庭湖流域水资源演变归因分析 [D]. 北京: 清华大学, 2014. (XIAO P. Analysis on the evolution of water resources in Dongting Lake Basin [D]. Beijing: Tsinghua University, 2014. (in Chinese))
- [28] 杨贵羽, 王知生, 王浩, 等. 海河流域 ET<sub>0</sub> 演变规律及灵敏度分析 [J]. 水科学进展, 2009, 20(3): 409-415. (YANG G Y, WANG Z S, WANG H, et al. Potential evapotranspiration evolution rule and its sensitivity analysis in Haihe River basin [J]. Advances in Water Science, 2009, 20(3): 409-415. (in Chinese)) DOI: 1001-6791(2009)03-0409-07.