

城市雨水管理

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2021.09.018

## 以径流污染为指标的降雨重要性分类

李 哲<sup>1,2,3</sup>, 周 毅<sup>1,2,3</sup>, 吴丽珍<sup>1,2,3</sup>, 王莉芸<sup>4</sup>

(1. 武汉大学 土木建筑工程学院, 湖北 武汉 430072; 2. 湖北省城市综合防灾与消防救援工程技术研究中心, 湖北 武汉 430072; 3. 海绵城市建设水系统科学湖北省重点实验室 <武汉大学>, 湖北 武汉 430072; 4. 深圳市建筑科学研究院股份有限公司, 广东 深圳 518000)

**摘 要:** 根据径流冲刷污染量,对场次降雨重要性提出划分标准,可以有重点地开展降雨径流污染监测工作,也可降低实际工程中对多年详细场次降雨资料的依赖。在长时间序列降雨资料的基础上,根据降雨径流污染程度的不同对降雨分类,找出径流污染较大的降雨(即重要降雨)。根据各类降雨特征参数(干旱时间和场次降雨量)的不同,用模糊 C 均值聚类法把降雨分为 3 类,分别为重要降雨、一般降雨和不重要降雨。研究提出降雨重要性分类方法,并应用于深圳市 WH 河流域案例。结果表明,绘制重要性不同降雨分布图,可以相对划分各类降雨分布区域,建立分类标准,处于模糊区域的降雨则需结合其他因素判别。

**关键词:** 径流污染; 重要性; 模糊 C 均值聚类法; 长时间序列降雨; 场次降雨; 干旱时间

**中图分类号:** TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2021)09-0110-06

## Rainfall Importance Classification Based on Runoff Pollution

LI Zhe<sup>1,2,3</sup>, ZHOU Yi<sup>1,2,3</sup>, WU Li-zhen<sup>1,2,3</sup>, WANG Li-yun<sup>4</sup>

(1. School of Civil Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, China; 2. Engineering Research Center of Urban Disasters Prevention and Fire Rescue Technology of Hubei Province, Wuhan 430072, China; 3. Hubei Key Laboratory of Water System Science for Sponge City Construction <Wuhan University>, Wuhan 430072, China; 4. Shenzhen Institute of Building Research Co. Ltd., Shenzhen 518000, China)

**Abstract:** According to the amount of runoff pollution, a classification standard based on the importance of rainfall was proposed, which could be used to monitor rainfall runoff pollution and reduce the dependence on multi-year detailed rainfall data in practical engineering application. Based on long-term series of rainfall data, the rainfall was classified according to the degree of rainfall runoff pollution, and the rainfall with large runoff pollution (important rainfall) was determined. According to different types of rainfall characteristic parameters (dry weather days and rainfall depth), fuzzy C-means clustering method was applied to classify rainfalls into three categories: important rainfall, general rainfall and unimportant rainfall. A rainfall importance classification method was proposed and applied to the WH

river basin in Shenzhen. By drawing rainfall distribution maps with different importance, various rainfall distribution areas were relatively divided and a classification standard was established. However, rainfalls in fuzzy areas needed to be distinguished by combining other factors.

**Key words:** runoff pollution; importance; fuzzy *C*-means clustering; long-term series of rainfall; rainfall event; dry weather days

多年详细场次降雨资料不足,会影响径流污染全面、详细的估算。另外,若对每场降雨、径流污染物变化过程全程监测,将增加监测工作量。因此,对降雨径流污染的研究,只能选择部分典型降雨或一场降雨某些时段。例如:一些关注初期降雨径流污染,一些关注暴雨时径流污染,还有一些对真实降雨做实测研究。

对于初期径流污染,现有设计规范对初期降雨已有明确建议值。例如:《城镇雨水调蓄工程技术规范》(GB 51174—2017)对初期降雨径流弃流量指定为4~8 mm。但是该取值范围没有充分考虑干旱天数、降雨总量、降雨强度对污染物积累和冲刷总量的影响。在已有的研究中,车伍<sup>[1]</sup>、Cai<sup>[2]</sup>等发现降雨量、降雨强度、干旱时间都对污染物冲刷有影响。熊壮<sup>[3]</sup>进一步指出:径流污染物浓度随降雨量增加而变小,污染物冲刷量随干旱时间增大而增大。可以认为,径流污染因素和机理十分复杂,并非只限于初期降雨深度。

另有一些研究关注暴雨时径流污染,如:张勤等<sup>[4]</sup>发现不同暴雨重现期,LID设施与雨水调蓄池联合运行对径流、污染物总量均有明显削减作用。然而,尽管暴雨冲刷量大,但在全年降雨径流中占比有限,且暴雨时主要关注点是防洪排涝,径流污染危害相对次要。

还有一些针对真实降雨实测研究,例如李青云<sup>[5]</sup>选取10场降雨,研究北京村镇地表径流污染物排放特征、初期冲刷效应;张郁婷等<sup>[6]</sup>选取3次有效降雨事件,研究东江不同功能区初期雨水径流污染特征。但有限几场真实降雨还不能充分反映多个降雨特征参数对污染物冲刷的影响。

本研究结合具体案例,使用长时间序列降雨(即多场次降雨),以6种污染物(SS、COD、TN、TP、NH<sub>3</sub>-N、BOD<sub>5</sub>)冲刷量为考察指标,应用模糊C均值聚类法,把降雨分为3类,即重要降雨、一般降雨和不重要降雨,依据降雨特征参数不同,建立划分标准。总结特定地区重要降雨特征,一方面便于重点

监测重要降雨径流污染,另一方面可降低实际工程对详细降雨资料的依赖。

## 1 降雨重要性判定理论基础及影响因素

### 1.1 降雨重要性判定理论基础

以降雨径流冲刷污染量为指标,判别场次降雨重要性,径流污染较大则为重要降雨。径流冲刷污染量与污染物积累、径流冲刷密切相关,这两个过程分别用积累函数和冲刷函数模拟。无雨时污染物逐渐积累,降雨时污染物随降雨径流被冲刷,模型中积累与冲刷根据当时是否有降雨而交替进行。

#### ① 污染物积累模型

用指数函数模拟污染物的积累过程,得到了较广泛的认可,陈桥等<sup>[7]</sup>指出指数函数符合污染物积累速率随时间增加而逐渐减小,积累量趋近于极大值的实际情况。本研究中使用指数函数作为污染物积累模型函数:

$$B = K_1(1 - e^{-K_2 t}) \quad (1)$$

式中: $B$ 为污染物积累量,kg; $K_1$ 为污染物最大积累量,kg/hm<sup>2</sup>; $t$ 为干旱天数,d; $K_2$ 为积累率,d<sup>-1</sup>。

在该函数中,最大积累量 $K_1$ 和积累率 $K_2$ 在特定区域一般认为是相对稳定的常数。干旱天数 $t$ ,也就是雨前无雨天数,在模型中是唯一自变量,与季节关系密切且具有明显的随机性。

#### ② 污染物冲刷模型

指数型冲刷函数是一种被广泛接受的模型函数。陈桥等<sup>[7]</sup>指出城市地表污染物的冲刷过程符合指数关系。形式如下:

$$W = C_1 q^{C_2} B \quad (2)$$

式中: $C_1$ 为冲刷系数; $C_2$ 为冲刷指数; $q$ 为单位面积径流率,mm/h; $B$ 为污染物积累量,kg; $W$ 为污染物冲刷量,kg/h。

在该函数中,冲刷系数 $C_1$ 和冲刷指数 $C_2$ 在特定区域一般认为是相对稳定的常数,污染物积累量 $B$ 由积累函数决定。单位面积径流率 $q$ 是唯一的自变量,但是该自变量一般无法直接观测,只能通过径流产流和汇流模型估算。

## 1.2 降雨重要性判定影响因素

降雨径流冲刷污染量与雨前污染物积累、径流冲刷能力有关。降雨特征参数,即干旱时间、场次降雨量、降雨强度影响上述两方面,具体而言:前期降雨之后剩余污染量和干旱时间共同决定雨前污染物积累量。干旱时间直接影响雨前污染物积累量,剩余污染量则是间接影响,即剩余污染物由本场降雨继续冲刷,若剩余污染量大,则两者共同影响;反之,剩余污染量就成为次要因素。而剩余污染量又由前期降雨过程、前期降雨干旱时间共同决定,整个影响过程和因素十分复杂。

通过式(2)可以发现,径流冲刷能力由污染物积累量  $B$  和单位面积径流率  $q$  共同决定。这里的  $q$  可以理解为一场降雨过程中的平均单位面积径流率,而场次降雨量、降雨强度共同决定了  $q$ ,间接反映了径流冲刷能力。

## 2 降雨重要性分类计算步骤

首先确定场次降雨划分最短时间间隔并划分场次降雨,然后计算每场降雨各污染物冲刷量,最后应用模糊  $C$  均值聚类法,以各污染物冲刷量为指标,根据降雨特征参数不同,分为3类,分别为重要降雨、一般降雨、不重要降雨。

### 2.1 场次降雨划分

由于研究相对独立场次降雨及其产生径流污染,因此界定场次降雨十分必要。张宇航等<sup>[8]</sup>指出最短降雨间隔时间是影响降雨场次划分结果的重要因素,随着最短降雨间隔时间的增加,中等和强降雨事件的发生频率与降雨总量随之增加;Adams等<sup>[9]</sup>提出进行场次降雨划分的降雨间隔在1~6 h之间则实际应用性较强。实际工程中可构建模型,结合流域面积、地形、下垫面、管网等因素综合确定最短降雨时间间隔。

### 2.2 污染物冲刷量的计算

在降雨、地形、下垫面和污染物积累冲刷资料完整的情况下,利用SWMM计算得到末端节点任意时刻的径流量、各污染物浓度。依据场次降雨划分结果,按照以下步骤进行计算:①每场降雨各污染物冲刷量;②研究区各污染物的最大积累量;③计算所有场次降雨各污染物的冲刷相对百分数(代表污染物冲刷量的多少),以SS为例,某场降雨的SS冲刷相对百分数即为该场降雨的SS冲刷量除以SS最大积累量。

## 2.3 模糊 $C$ 均值聚类法的应用

降雨径流对污染物冲刷量是否足够大,判断标准是模糊的。用模糊数学的理论和方法可以对降雨重要性做出模糊的判断和分类。

模糊  $C$  均值聚类是聚类理论、模糊理论相融合的一种聚类算法。通过分析聚类对象之间的关系,确定划分类数,每个聚类对象不是严格划分到某一类,而是以一定隶属度属于某一类,根据隶属度大小进行聚类。而传统的系统聚类法以及  $K$  均值聚类法,将聚类对象严格地划分到某一类,非此即彼。本研究判断标准具有模糊性,故而应用模糊  $C$  均值聚类法。

### 2.3.1 计算原理

本研究中,以  $n$  场降雨为聚类对象,以6种污染物(SS、COD、TN、TP、 $\text{NH}_3 - \text{N}$ 、 $\text{BOD}_5$ )冲刷量为聚类指标,聚类指标的聚类值为6种污染物的冲刷相对百分数。 $n$ 场降雨6个指标的聚类值构成矩阵  $X = \{x_{ij}\}$  ( $i = 1, 2, \dots, n; j = 1, 2, \dots, 6$ ),其中,  $x_{ij}$  为第  $i$  场降雨、第  $j$  个污染物的冲刷相对百分数。

径流污染程度不同,降雨重要性也随之不同,据此把所有降雨分为3类,即重要降雨、一般降雨和不重要降雨。每类降雨都有聚类中心  $C = \{c_1, c_2, c_3\}$ ;模糊聚类关键是确定聚类对象分属于各类的隶属度,令  $u_{ai}$  表示第  $i$  场降雨属于第  $a$  类的隶属度 ( $0 \leq u_{ai} \leq 1, \sum_{a=1}^3 u_{ai} = 1$ ),场次降雨的初始隶属度取均匀分布的随机数,最终隶属度的取值通过逐步迭代得出。为了建立迭代计算的终止条件,需定义一个目标函数:

$$J(U, C) = \sum_{i=1}^n \sum_{a=1}^3 u_{ai}^m d_{ai}^2 \quad (3)$$

式中:  $J(U, C)$  表示各类的场次降雨到对应聚类中心的加权平方距离之和 ( $U$  为所有场次降雨分属于上述3类降雨的隶属度矩阵),权重为  $u_{ai}^m$  (一般地,  $m=2$ ),  $d_{ai} = \|x_i - c_a\|$ , 即第  $i$  场降雨的冲刷相对百分数矩阵  $X_i$  到第  $a$  类的聚类中心的距离。

原则上把污染物冲刷量差异最小的场次降雨划分到同一类,与之对应的迭代终止条件是  $J(U, C)$  达到最小值。设定终止容限  $\varepsilon > 0$  ( $\varepsilon$  一般取值为  $10^{-6}$ ),逐步迭代,求得隶属度矩阵  $U$  和聚类中心  $C$ ,使  $\|J' - J'^{-1}\| < \varepsilon$ ;迭代完成,得到最终隶属度矩阵  $U = (u_{ai})_{3 \times n}$ ,按照最大隶属度原则确定每场降雨的类别,即场次降雨在哪一类的隶属度最大就属于



该类型降雨。

### 2.3.2 计算步骤

计算步骤如图1所示。

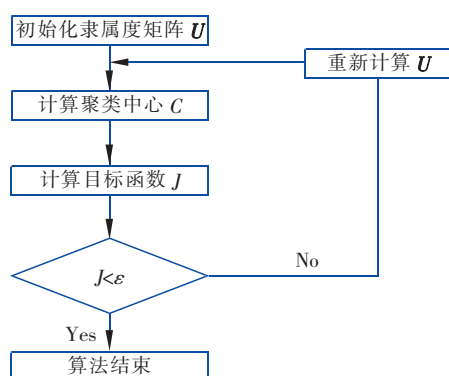


图1 模糊C均值聚类法计算步骤

Fig. 1 Calculation procedures of fuzzy C-means clustering method

① 场次降雨隶属度矩阵  $U^{(t)} = [u_{ai}^{(t)}]$ 。  $t=0$ , 即随机确定的初始隶属矩阵;  $t \geq 1$ , 开始迭代计算。

②  $t=1$  表示第1次迭代, 第  $t$  次迭代的聚类中心  $C_a^{(t)}$  为:

$$C_a^{(t)} = \frac{\sum_{i=1}^n [u_{ai}^{(t-1)}]^m X_i}{\sum_{i=1}^n [u_{ai}^{(t-1)}]^m}, a=1, 2, 3 \quad (4)$$

③ 计算第  $t$  次迭代的目标函数值  $J^{(t)}$  [见式(3)], 其中:

$$u_{ai}^{(t)} = 1 / \sum_{l=1}^3 [d_{ai}^{(t)} / d_{li}^{(t)}]^{\frac{2}{m-1}}, a=1, 2, 3; i=1, 2, \dots, n; l=1, 2, 3 \quad (5)$$

$$d_{ai}^{(t)} = \|X_i - C_a^{(t)}\| \quad (6)$$

$$d_{li}^{(t)} = \|X_i - C_l^{(t)}\| \quad (7)$$

式中:  $l$  代表聚类类别, 计算  $u_{ai}^{(t)}$  时, 需要  $d_{ai}^{(t)}$  分别与  $d_{1i}^{(t)}$ 、 $d_{2i}^{(t)}$ 、 $d_{3i}^{(t)}$  相除。

④ 给定终止容限  $\varepsilon > 0$ , 当  $t > 1$ 、 $|J^{(t)} - J^{(t-1)}| < \varepsilon$  时, 停止迭代, 否则  $t = t + 1$ , 转到第②步, 不断迭代直到满足迭代终止条件为止。

应用 MATLAB 实现聚类计算, 输入矩阵  $X$ , 设置幂指数  $m=2$ 、 $\varepsilon=10^{-6}$ 。场次降雨隶属度  $U$  是一个  $3 \times 102$  的矩阵, 每一列是一场降雨分属于3类的隶属度。每场降雨按照最大隶属度原则确定类别。

最后, 归纳各类降雨在场次降雨量和干旱时间上的特征, 建立降雨的分类标准。

## 3 案例分析

### 3.1 项目研究区域概况

以深圳市 WH 河流域为研究区域, 总面积为

1 096.72  $\text{hm}^2$ 。利用 SWMM 建立区域径流模型, 将研究区划分为 81 块子汇水区域, 各子汇水区域面积为 1.3 ~ 194  $\text{hm}^2$  不等, 模型中有节点 41 个、管段 40 根。由于汛期降雨次数多, 冲刷量占比也较大, 是研究的重点。本研究选取 2019 年 5 月—10 月的全部降雨(时间步长为 5 min), 基本涵盖了全部汛期。污染物积累、冲刷函数中的参数取值依据 SWMM 模型用户手册<sup>[10]</sup>以及深圳市对地表径流的调查研究成果。

### 3.2 研究区场次降雨划分

根据研究区下垫面、地形、管网资料建立 SWMM 模型, 试算发现: 对各等级的代表性降雨, 在降雨结束后 5 h 内产生的径流量最少占总径流量的 86%, 各污染物冲刷量最少占总冲刷量的 90%。因此, 将 5 h 作为划分场次降雨的时间间隔, 2019 年 5 月—10 月的全部降雨分为 102 场降雨。此标准会随汇流区域面积不同而改变。

### 3.3 研究区影响冲刷量的降雨特征参数

由 2.2 节所述可知, 前期降雨之后剩余污染物量对雨前污染物积累量仅是间接影响, 而且其影响过程较为复杂, 因此本研究中只保留干旱时间作为特征参数。

场次降雨量、降雨强度对径流冲刷能力均有影响, 为比较二者的主次关系, 可以假定雨前污染物积累量为常数, 挑选场次降雨量相同、平均降雨强度相差数倍的几场实际降雨进行模拟计算。挑选的场次降雨量包括了小雨、中雨、大雨和暴雨级别的不同降雨, 研究场次降雨量对径流冲刷能力的影响。

模拟计算表明: 平均降雨强度相差 6 倍以内时, 降雨强度对冲刷能力影响差别并不显著; 平均降雨强度相差 10 倍以上, 降雨强度只对 TP、 $\text{NH}_3 - \text{N}$  的冲刷能力影响显著, 对其余污染物(SS、COD、TN、 $\text{BOD}_5$ )影响差别并不显著。可以认为, 在本研究区域内, 场次降雨量是影响径流冲刷能力的主要因素, 而降雨强度是相对次要因素。

综上, 可以把场次降雨量、干旱时间作为判断降雨重要性的特征参数。

### 3.4 研究区域降雨重要性分类

以场次降雨量为横坐标、干旱时间为纵坐标, 依据聚类结果, 把各场降雨标注在图上。应用模糊 C 均值聚类法, 确定各类降雨边界, 建立研究区降雨重要性分类标准。结果如图 2 所示。

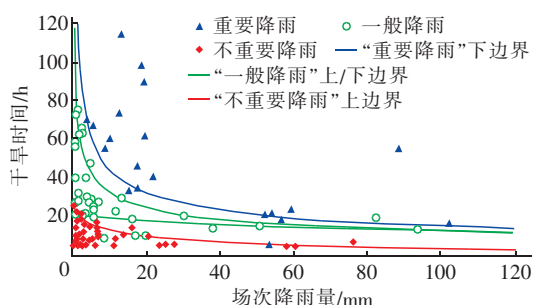


图2 重要性不同的降雨分布

Fig. 2 Distribution of different rainfall levels

### 3.4.1 确定分类边界的原则

尽管根据模糊  $C$  均值聚类法得到的分类标准是模糊的,但是在工程实践中,为了使分类更有可操作性,还是需要进一步去模糊化,得到清晰的分界线。因此,确定分界线的原则是:落在分界线两侧的降雨,被“误判”的比例越少越好。

### 3.4.2 降雨的分类标准

图2中,场次降雨量越大且干旱时间越长的降雨,污染物冲刷量越大,重要性更强;反之,重要性更低。为确定各类降雨边界,找到组成每一类别所有点的外包络线,并对外包络线选取一部分进行曲线拟合,得到的曲线作为降雨分类的边界线。其中:

① 重要降雨:污染物冲刷量大的降雨,只需要确定包络线的左下方边界,也就是与一般降雨的分界线;

② 一般降雨:污染物冲刷量不太大的区域,也是重要降雨和不重要降雨之间的过渡区域,需同时确定包络线的左下方和右上方边界;

③ 不重要降雨:污染物冲刷量较小的降雨,只需确定此类降雨包络线右上方边界,也就是与一般降雨的分界线,这类降雨的左下方边界是坐标。

对包络线进行曲线拟合,其中各个曲线代表的边界线性质、边界线函数如表1所示。

表1 拟合得到的边界函数

Tab. 1 Fitted boundary function

边界线性质	边界线函数	说明
“重要降雨”下边界	$y = 128.54x^{-0.458}$	$R^2 = 0.97$
“一般降雨”上边界	$y = 80.388x^{-0.395}$	$R^2 = 0.92$
“一般降雨”下边界	$y = 0.0009x^2 - 0.1658x + 21.304$	$R^2 = 0.72$
“不重要降雨”上边界	$y = -4.005\ln x + 22.32$	$R^2 = 0.93$
“不重要降雨”下边界	$x = 0$ 和 $y = 0$	—
注: 边界线函数中 $x$ 为场次降雨量, $y$ 为干旱时间。		

### 3.4.3 讨论

① 模糊聚类的边界存在一定模糊性。从图2可以看出,即使画出了边界线,在其两侧还是有少量其他类别的降雨,因此边界线只是起到相对的划分作用。

② 各类边界线之间还存在不属于任何一类的空白区域,可看作是相邻两类区域的过渡区,其模糊程度更高,即:如果有降雨特征值落在这些空白区域内,那么究竟属于哪一类,很难做出明确的区分。在工程实践中,对落入这类区域的点,可以采取保守或乐观的标准进行划分。如果采用保守的标准,则划归重要性更高的一类;如果采取乐观的标准,则划归重要性较低的一类。

③ 导致判断标准不确定性的主要原因之一是:还有其他因素影响了降雨径流的污染物冲刷量,但是判断标准中没有考虑进来,例如前一场降雨未冲刷掉的剩余污染物。

④ 产汇流、污染积累、冲刷模型及参数选取均会显著影响降雨重要性判定结果,因此建立模型时,应选择适合研究区域的模型及参数。

## 4 结论

以径流污染为指标,在划分场次降雨的前提下,用污染物积累和冲刷模型作为工具,进行了长时间序列、多场次降雨径流模拟,对降雨的重要性分类标准进行了研究,并结合深圳市WH河流域的案例分

析,得出以下结论:

① 以6种代表性污染物(SS、COD、TN、TP、 $\text{NH}_3 - \text{N}$ 、 $\text{BOD}_5$ )冲刷量为评判指标,应用模糊  $C$  均值聚类法可以对所有场次降雨的重要性进行分类。

② 场次降雨量、雨前干旱时间可以作为判断降雨重要性的特征参数,绘制重要性不同降雨分布图,建立分类标准,并可以列出分类的边界函数。

③ 处于模糊区域的降雨,需要考虑其他条件来进一步判断。

## 参考文献:

- [1] 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).
- [2] CAI Y, ZHANG P, WANG J. A simulation-based real-

- time control system for reducing urban runoff pollution through a stormwater storage tank [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2018, 183: 641 – 652.
- [ 3 ] 熊壮. 宜兴市道路径流污染特征与调蓄池容积研究 [D]. 西安:西安建筑科技大学, 2018.
- XIONG Zhuang. Study on the Characteristics of Road Runoff Pollution in Yixing City and the Volume of Storage Pond [D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2018 (in Chinese).
- [ 4 ] 张勤, 陈思飘, 蔡松柏, 等. LID 措施与雨水调蓄池联合运行的模拟研究 [J]. *中国给水排水*, 2018, 34(9): 134 – 138.
- ZHANG Qin, CHEN Siyao, CAI Songbai, *et al.* Simulation of LID measures combined with stormwater detention tank [J]. *China Water & Wastewater*, 2018, 34(9): 134 – 138 (in Chinese).
- [ 5 ] 李青云. 北京典型村镇降雨径流水文、水质及污染特性的研究 [D]. 北京:北京交通大学, 2011.
- LI Qingyun. Characterization of Rainfall-runoff Hydrology, Water Quality Pollution from Villages in Beijing [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2011 (in Chinese).
- [ 6 ] 张郁婷, 陈永华, 汤春芳, 等. 东江上游高风险支流不同功能区初期雨水径流污染特征分析 [J]. *生态环境学报*, 2017, 26(11): 1942 – 1949.
- ZHANG Yuting, CHEN Yonghua, TANG Chunfang, *et al.* Pollution characteristics of rainwater runoff in different functional areas of high-risk tributaries in the upper reaches of the East River [J]. *Journal of Ecology and Environment*, 2017, 26(11): 1942 – 1949 (in Chinese).
- [ 7 ] 陈桥, 胡维平, 章建宁. 城市地表污染物累积和降雨径流冲刷过程研究进展 [J]. *长江流域资源与环境*, 2009, 18(10): 992 – 996.
- CHEN Qiao, HU Weiping, ZHANG Jianning. Advances in research on the build-up and rainfall runoff wash-off of urban surface pollutants [J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2009, 18(10): 992 – 996 (in Chinese).
- [ 8 ] 张宇航, 杨默远, 潘兴瑶, 等. 降雨场次划分方法对降雨控制率的影响分析 [J]. *中国给水排水*, 2019, 35(13): 122 – 127.
- ZHANG Yuhang, YANG Moyuan, PAN Xingyao, *et al.* Influence of rainfall division method on capture ratio of rainfall [J]. *China Water & Wastewater*, 2019, 35(13): 122 – 127 (in Chinese).
- [ 9 ] ADAMS B J, FRASER H G, HOWARD C D D, *et al.* Meteorological data analysis for drainage system design [J]. *Journal of Environmental Engineering*, 1986, 112(5): 827 – 848.
- [ 10 ] HARMEL R D, SMITH D R, KING K W, *et al.* Estimating storm discharge and water quality data uncertainty: a software tool for monitoring and modeling applications [J]. *Environmental Modelling & Software*, 2009, 24(7): 832 – 842.

作者简介: 李哲 (1996 – ), 男, 河北张家口人, 硕士研究生, 主要研究方向为给水排水管网系统。

E-mail: 1833768699@qq.com

收稿日期: 2020 – 02 – 10

修回日期: 2020 – 07 – 08

(编辑: 任莹莹)

强化水资源监管,

落实最严格水资源管理制度