

# 昆明地区3种典型降雨参数对滇池环湖截污干渠调蓄城市雨水效果的影响

苏定江<sup>1</sup>, 姚娟娟<sup>2</sup>, 胡欣逸<sup>2</sup>, 张智<sup>2</sup>, 蔡松柏<sup>3</sup>, 刘存<sup>2</sup>

(1. 重庆市市政设计研究院, 重庆 400012; 2. 重庆大学 城市建设与环境工程学院, 重庆 400045; 3. 中国市政工程西南设计研究总院有限公司, 四川 成都 610081)

**摘要:** 基于滇池环湖截污干渠“总氮浓度阈值-控制点液位/总氮浓度通量”城市初期雨水收集调蓄技术, 考察了昆明地区3种典型降雨参数对滇池环湖截污干渠(以下简称干渠)东岸段截留城市雨水径流中典型污染物效果的影响。研究采用 Box-Benhnken 的响应面法, 分析了滇池东岸典型降雨参数——雨峰位置、降雨历时、前次与本次降雨时间间隔三因素三水平, 对东岸干渠截流城市雨水径流中4种典型污染物 COD, SS, TN, TP 效能的影响。结果表明:3个典型降雨参数对于在“总氮浓度阈值-液位/总氮负荷通量”调蓄运行模式下的雨水径流收集率存在显著的线性、平方以及双因子交互影响, 对于4种典型污染物收集率只存在线性影响。研究建立3个典型降雨参数与雨水收集率以及污染物收集率的数学模型, 为干渠的雨洪高效管理提供参考。

**关键词:** 典型降雨参数; 截污干渠; 城市雨水调蓄; SWMM; 响应面; 截留率

中图分类号: X52 文献标识码: A 文章编号: 1672-643X(2019)03-0053-05

## Effect of three typical rainfall parameters in Kunming area on urban rainwater storage in Dianchi sewage interception trunk canal

SU Dingjiang<sup>1</sup>, YAO Juanjuan<sup>2</sup>, HU Xinyi<sup>2</sup>, ZHANG Zhi<sup>2</sup>, CAI Songbai<sup>3</sup>, LIU Cun<sup>2</sup>

(1. Chongqing Municipal Research Institute of Design, Chongqing 400012, China;

2. Urban Construction and Environmental Engineering, Chongqing University, Chongqing

400045, China; 3. Municipal Engineering Southwest Design and Research Institute of China, Chengdu 610081, China;)

**Abstract:** Based on the “TN concentration threshold-control point liquid level/TN concentration flux” urban rainwater storage method in Dianchi sewage interception trunk canal, this paper investigates the effects of three typical rainfall parameters on the retention of typical pollutants in urban runoff in Dianchi sewage interception trunk canal. The response surface method of Box-Benhnken was used to analyze the effects on the retention of four typical pollutants in urban runoff with three factors and three levels. The results showed that: three typical rainfall parameters have significant linear, square and bifactor interactions on the rainwater runoff collection rate, but only have significant linear on the four typical pollutants collection rate. The mathematical models of three typical rainfall parameters, rainwater collection rate and pollutant collection rate were established to provide reference for efficient management of storm flood in trunk canals.

**Key words:** typical rainfall parameter; sewage interception trunk canal; urban rainwater regulation; SWMM (Storm Water Management Model); response surface method; retention rate

### 1 研究背景

为了保护滇池水环境, 昆明市投资 55.24 亿元

建立了总长度为 50 km 的滇池环湖截污干渠(以下简称干渠)及配套管网收集系统。滇池东岸干渠分为污水干渠(断面 1.5 m × 4.5 m)和雨水干渠(断面

收稿日期: 2018-11-13; 修回日期: 2019-02-15

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2012ZX07102001-003)

作者简介: 苏定江(1979-), 男, 重庆人, 硕士, 高级工程师, 研究方向: 城市雨洪管理。

通讯作者: 姚娟娟(1982-), 女, 四川隆昌人, 博士, 副教授, 研究方向: 城市雨洪管理。

4.5 m × 4.5 m), 雨、污水渠隔墙上设置有孔口连通, 当雨水渠水位低于连通孔口底则实行雨污分流制, 降雨超过一定强度后雨水渠水位高于连通孔口底时实行合流制。该特殊设计使得干渠容积得到充分调用, 但经雨水干渠进入污水干渠的后期较洁净的雨水径流会对污水厂产生高水量、低浓度的冲击负荷<sup>[1-2]</sup>。依据滇池东岸城市初期雨水的水质水量规律以及雨水典型污染物相关性<sup>[1-3]</sup>, 基于“TN 浓度阈值 - 液位/TN 负荷通量”的干渠调蓄城市初期雨水方案被提出<sup>[4]</sup>, 并应用于干渠的实际运行管理中。前期研究发现, 不同降雨重现期对该方案截留城市雨水径流中典型污染物的效果影响显著, 重现期越高, 污染物收集效率提高越显著<sup>[4-6]</sup>。除重现期以外, 相关的研究还显示, 降雨雨峰位置<sup>[7-9]</sup>、降雨历时(相同降雨重现期)<sup>[10-11]</sup>、前次与本次降雨的间隔时间<sup>[5, 12-13]</sup>等其他典型降雨参数均会对城市雨水径流总量及雨水径流水质产生影响, 进而可能会影响到“TN 浓度阈值 - 液位/TN 负荷通量”调蓄运行模式下干渠收集城市雨水径流中典型污染物的效能。

本文以前期研究中所建立的基于 ArcGIS - SWMM 的滇池东岸干渠系统水质水量模型<sup>[14-17]</sup>为基础, 采用基于 Box - Behnken 的响应面分析法<sup>[18]</sup>, 全面考察了昆明地区 3 种典型降雨参数——雨峰位置、降雨历时、前次与本次降雨的间隔时间及其 3 个代表水平, 对于干渠东岸段“TN 浓度阈值 - 液位/TN 负荷通量”联合运行模式下干渠东岸段截流城市雨水径流中 4 种典型污染物 COD、SS、TN、TP 效能的影响, 为干渠的雨洪高效管理提供参考。

## 2 基于 Box - Behnken 响应面设计

### 2.1 因素水平的选取

通过分析昆明市 1995 - 2009 年逐时降雨雨量数据以及昆明市呈贡区(滇池东岸)2010 - 2016 年逐分钟降雨雨量数据, 确定具有昆明地区具有代表性的雨峰位置、降雨历时、前次降雨与本次降雨的间隔时间 3 因素水平。

2.1.1 雨峰位置的水平选取 昆明市呈贡区(滇池东岸)1995 - 2009 年逐时降雨雨量数据及 2010 - 2016 年逐分钟降雨雨量数据统计发现: 昆明地区降雨以单峰雨型为主, 占降雨总场次的 54%; 其次, 雨峰位于降雨历时(0 ~ 1/4)时间、(1/4 ~ 2/4)时间及(2/4 ~ 3/4)时间的降雨占雨总场次的百分比分别为 58%、18%、12%。故研究选取 1/4 时间、2/4 时

间和 3/4 时间为雨峰位置代表水平。

2.1.2 降雨历时的水平选取 昆明市呈贡区(滇池东岸)1995 - 2009 年逐时降雨雨量数据及 2010 - 2016 年逐分钟降雨雨量数据统计发现: 昆明地区降雨均以短历时(1 ~ 3 h)为主, 占了总体降雨场次的 55%。降雨历时频率最高为: 2 h(占全部场次降雨量的 22.8%)、1 h(17%)及 3 h(15%)。相同降雨重现期下, 降雨历时越短, 则雨水径流流量峰值越高, 雨水径流对地表的冲刷效应也越显著, 同时雨水径流的污染物浓度越高。兼顾干渠收集雨水中污染物的不利原则, 本文选用 1、2 和 3 h 为降雨历时代表水平。

2.1.3 前场与本场降雨间隔时间的水平选取 昆明市呈贡区(滇池东岸)1995 - 2009 年逐时降雨雨量数据及 2010 - 2016 年逐分钟降雨雨量数据统计发现: 出现频率最多的相邻两场降雨时间间隔为 2 h, 占降雨总场次 11%, 其次为 25 ~ 36 h, 占降雨总场次 7%, 再次为 61 ~ 72 h, 占降雨总场次 5.6%。相同降雨重现期下, 前场与本场降雨间隔时间越长, 地表污染累积效应越明显, 雨水径流中污染物浓度越高; 但地表渗透性增强, 雨水径流总量可能减少。另一方面, 前场与本场降雨间隔时间能一定程度上反映旱季与雨季。综合考虑, 选取 2、37 和 72 h 为前场与本场降雨间隔时间的代表水平。

### 2.2 响应量的选取及计算

本文选择雨水干渠对城市雨水径流量, 城市雨水径流中 SS、COD、TN 以及 TP 的收集率 4 个指标作为“TN 浓度阈值 - 液位/TN 负荷通量”调蓄运行模式下的响应变量。由于昆明市无官方暴雨设计方法, 故根据昆明市降雨强度公式及常用芝加哥暴雨设计方法确定模拟用降雨序列。通过 ArcGIS - SWMM 的滇池东岸干渠系统水质水量模型, 在干渠“TN 浓度阈值 - 液位/TN 负荷通量”调蓄运行模式下, 模拟计算了重现期  $P = 1$  a 时, 不同雨峰位置、降雨历时、前次降雨与本次降雨的间隔的干渠对城市雨水径流量以及城市雨水径流中 SS、COD、TN 和 TP 的收集率。

### 2.3 三因素三水平 Box - Behnken 响应面法的设计

采用 Box - Behnken 设计了三因素三水平共 15 个模拟计算场景(如表 1 所示)。研究采用多元二次回归方程拟合因素与响应变量之间的函数关系, 并通过方差分析来判断回归方程的显著性。

$$Y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i X_i + \sum_{i=1}^{i-1} \sum_{j=1}^k \beta_{ij} X_i X_j + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} X_i^2 \quad (1)$$

式中:  $Y$  为预测响应值;  $\beta_0$ 、 $\beta_i$  和  $\beta_{ii}$  分别为偏移项、线性偏移和二阶偏移;  $\beta_{ij}$  为交互作用系数;  $X_i$  为自变量编码值,它同自变量实验水平实际值  $x_i$  的换算公式如下:

$$X_i = (x_i - x_{i,0}) / (x_{i,+} - x_{i,-}) \quad (2)$$

式中:  $x_{i,0}$ 、 $x_{i,+}$  和  $x_{i,-}$  分别为自变量在编码水平为 0, 1 和 -1 时的实际值。

Box - Behnken 设计及其模拟计算结果如表 2 所列。

表 1 因素水平和编码

| 变量                    | 参数    |       | 编码水平 |     |      |
|-----------------------|-------|-------|------|-----|------|
|                       | 未编码   | 编码    | -1   | 0   | 1    |
| $X_1$ - 雨峰位置          | $x_1$ | $X_1$ | 0.25 | 0.5 | 0.75 |
| $X_2$ - 降雨历时/h        | $x_2$ | $X_2$ | 1    | 2   | 3    |
| $X_3$ - 前场与本场降雨时间间隔/h | $x_3$ | $X_3$ | 2    | 37  | 72   |

表 2 Box - Behnken 设计及其模拟计算结果 %

| 试验编号 | $X_1$ | $X_2$ | $X_3$ | 雨水径流收集率 | SS 收集率 | COD 收集率 | TN 收集率 | TP 收集率 |
|------|-------|-------|-------|---------|--------|---------|--------|--------|
| 1    | 0     | -1    | 1     | 60.47   | 52.82  | 56.40   | 63.02  | 57.57  |
| 2    | 1     | -1    | 0     | 60.38   | 52.95  | 57.19   | 63.98  | 58.58  |
| 3    | 0     | 0     | 0     | 52.23   | 49.13  | 53.59   | 61.27  | 54.68  |
| 4    | 1     | 0     | 1     | 51.96   | 42.80  | 46.42   | 55.62  | 47.66  |
| 5    | 0     | 0     | 0     | 54.84   | 51.31  | 56.59   | 66.11  | 57.92  |
| 6    | 0     | 1     | 1     | 48.63   | 44.10  | 47.69   | 56.45  | 48.52  |
| 7    | -1    | -1    | 0     | 60.63   | 56.15  | 60.20   | 65.87  | 61.23  |
| 8    | -1    | 0     | 1     | 52.94   | 50.47  | 54.16   | 61.05  | 54.76  |
| 9    | 1     | 1     | 0     | 47.69   | 43.23  | 48.29   | 57.69  | 49.64  |
| 10   | 1     | 0     | -1    | 44.32   | 44.60  | 51.24   | 58.34  | 52.95  |
| 11   | 0     | 0     | 0     | 52.10   | 49.03  | 53.42   | 60.89  | 54.48  |
| 12   | -1    | 0     | -1    | 52.83   | 58.22  | 63.63   | 68.54  | 64.67  |
| 13   | 0     | 1     | -1    | 45.17   | 51.02  | 57.92   | 65.05  | 59.56  |
| 14   | -1    | 1     | 0     | 49.60   | 50.95  | 55.50   | 62.43  | 56.15  |
| 15   | 0     | -1    | -1    | 60.19   | 56.29  | 60.25   | 63.83  | 61.27  |

### 3 结果分析与讨论

#### 3.1 3 种典型降雨参数对雨水径流量收集率的影响

利用软件 Minitab,以雨峰位置、降雨历时、前场与本场降雨时间间隔为自变量,以在“TN 浓度阈值 - 液位/TN 负荷通量”调蓄运行模式下水径流收集率为响应值,对表 2 数据进行多元回归分析,并去

除部分明显不显著项,增加模型精度,得到多元二次回归方程(下式均为编码值):

$$\begin{aligned} \text{雨水收集率} = & 0.52569 - 0.01456 X_1 - \\ & 0.06323 X_2 + 0.01436 X_3 + 0.02371 X_2 \cdot X_2 + \\ & 0.01883 X_1 \cdot X_3 \end{aligned} \quad (3)$$

式中:  $X_1$  为雨峰位置;  $X_2$  为降雨历时, h;  $X_3$  为前次与本次降雨间隔时间, h。

回归方程的方差分析如表 3 所示,整体模型  $P$  值小于 0.001,失拟 0.554 远远大于 0.05,表明该模型失拟不显著,方程对实验有较好的拟合性,实验误差较小;复相关系数  $R - sq$  以及修正的复相关系数  $R - sq$ (调整)的数值接近于 1,说明模型相关性较好。模型中,雨峰位置影响显著,降雨历时影响非常显著,前场与本场降雨时间间隔影响显著;二次项中,仅有降雨历时的平方影响显著,其他均不显著;交互项中,雨峰位置、前次与本次降雨间隔时间交互影响显著,其余不显著。

在相同的降雨重现期下,雨峰位置越靠前,雨水径流峰值出现越早,干渠前期为空,能收集更多雨水径流;而降雨历时越短,干渠负荷越小,使得干渠能截留更多雨水径流;前次与本次降雨间隔时间越长,干渠容积负荷得到缓冲,使干渠能截留更多雨水径流。

雨峰位置、前次与本次降雨间隔时间交互影响如图 1 所示。当雨峰位置越靠后、前次与本次降雨间隔时间越长时,土壤含水量越低,能对前期雨水径流起到缓冲作用,干渠有更多空间收集后期径流雨水峰值,提高干渠雨水收集率。

表 3 雨水径流量收集率回归模型的方差分析

| 来源              | 自由度 | 离差平方和    | 均方差      | F 值    | P 值    |
|-----------------|-----|----------|----------|--------|--------|
| 模型              | 6   | 0.040124 | 0.006687 | 26.39  | <0.001 |
| 线性              | 3   | 0.035326 | 0.011775 | 46.47  | <0.001 |
| $X_1$           | 1   | 0.001697 | 0.001697 | 6.7    | 0.032  |
| $X_2$           | 1   | 0.031979 | 0.031979 | 126.21 | <0.001 |
| $X_3$           | 1   | 0.001650 | 0.001650 | 6.51   | 0.034  |
| 平方              | 2   | 0.003381 | 0.001690 | 6.67   | 0.02   |
| $X_2^2$         | 1   | 0.002089 | 0.002089 | 8.24   | 0.021  |
| 双因子交互作用         | 1   | 0.001418 | 0.001418 | 5.59   | 0.046  |
| $X_1 \cdot X_3$ | 1   | 0.001418 | 0.001418 | 5.59   | 0.046  |
| 误差              | 8   | 0.002027 | 0.000253 |        |        |
| 失拟              | 6   | 0.001549 | 0.000258 | 1.08   | 0.554  |
| 纯误差             | 2   | 0.000478 | 0.000239 |        |        |
| 合计              | 14  | 0.042152 |          |        |        |
| $R - sq$        |     | 95.75%   |          |        |        |
| $R - sq$ (调整)   |     | 91.57%   |          |        |        |

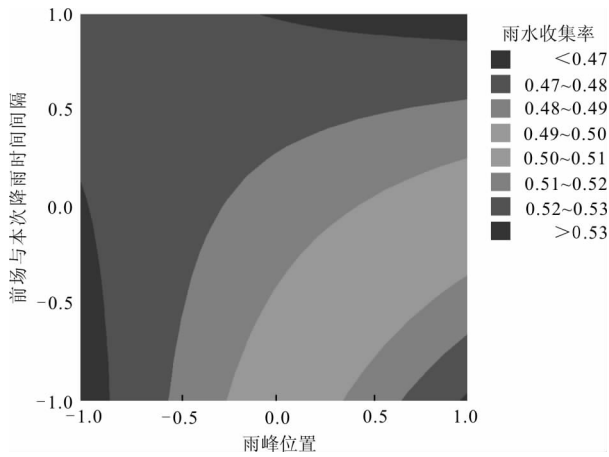


图1 雨峰位置与前次与本次降雨时间间隔的交互影响

### 3.2 3种典型降雨参数对雨水径流中4种典型污染物收集率的影响

利用软件 Minitab, 以雨峰位置、降雨历时、前场与本场降雨时间间隔为自变量, 以“TN 浓度阈值-液位/TN 负荷通量”调蓄运行模式下 SS、COD、TN、TP 收集率为响应值, 对表 2 数据进行多元回归分析。结果显示, 自变量与响应值之间仅存在线性关系(具体如下):

$$SS = 0.50205 - 0.04026X_1 - 0.03614X_2 - 0.02492X_3 \quad (4)$$

$$COD = 0.54833 - 0.03794X_1 - 0.03080X_2 - 0.03546X_3 \quad (5)$$

$$TN = 0.62009 - 0.02783X_1 - 0.01885X_2 - 0.02453X_3 \quad (6)$$

$$TP = 0.55976 - 0.03498X_1 - 0.03097X_2 - 0.03743X_3 \quad (7)$$

式中:  $X_1$  为雨峰位置;  $X_2$  为降雨历时, h;  $X_3$  为前次与本次降雨时间间隔, h。

回归方程的方差分析如表 4 所示, 4 个模型除 TN 收集率的  $P$  值均小于 0.001 外, TN 收集率模型的  $P$  值为 0.003, 说明影响因素影响度均为显著; 失拟远远大于 0.05, 表明 4 个模型失拟不显著; 4 个模型的复相关系数  $R-sq$  以及修正的复相关系数  $R-sq$  (调整) 的数值接近于 1, 说明 4 个模型相关性较好。

模型中, 不同降雨条件对于 4 种典型污染物收集率的影响, 仅存在线性关系, 不存在平方以及双因子交互作用。对于 SS、COD、TN、TP 收集率, 雨峰位置、降雨历时、前次与本次降雨时间间隔影响均为显著。SS、COD、TN、TP 污染物的收集率与雨峰位置、降雨历时、前次与本次降雨时间间隔 4 种自变量为

负相关。

在同一降雨重现期下, 随着雨峰位置增大, 雨水径流量峰值时间推后, 使得干渠在高负荷下收集峰值雨水径流, 导致干渠对 4 种污染物的收集率逐渐减少; 随着降雨历时的增大, 使得干渠处于高负荷收集状态的时间增加, 导致干渠对 4 种污染物的收集率逐渐减少; 而随着前次与本次降雨时间间隔的增大, 更为干燥的土壤能储蓄更多雨水, 所以干渠收集到的雨水径流中污染物总量减少, 使得 4 种污染物的收集率减少。

表 4 SS、COD、TN、TP 4 种污染物收集率回归模型方差分析

| 来源  | 自由度 | SS<br>P 值 | COD<br>P 值 | TN<br>P 值 | TP<br>P 值 |
|-----|-----|-----------|------------|-----------|-----------|
| 模型  | 3   | <0.001    | <0.001     | 0.003     | <0.001    |
| 线性  | 3   | <0.001    | <0.001     | 0.003     | <0.001    |
| A   | 1   | <0.001    | <0.001     | 0.006     | 0.001     |
| B   | 1   | <0.001    | 0.001      | 0.043     | 0.002     |
| C   | 1   | 0.005     | <0.001     | 0.013     | <0.001    |
| 误差  | 11  |           |            |           |           |
| 失拟  | 9   | 0.295     | 0.484      | 0.775     | 0.517     |
| 纯误差 | 2   |           |            |           |           |
| 合计  | 14  |           |            |           |           |

对前述响应面实验结果进行分析可以发现, 重现期为 1 a、雨峰位置为 0.25 ~ 0.75、降雨历时为 1 ~ 3 h、前次与本次降雨时间间隔为 2 ~ 72 h 时, 干渠雨水收集率范围为 44.32% ~ 60.63%, SS、COD、TN、TP 的收集率范围分别为 42.80% ~ 58.22%、46.42% ~ 63.63%、56.34% ~ 68.54%、47.62% ~ 64.47%。而雨峰位置越靠前, 降雨历时越短, 前次与本次降雨时间间隔越短, 会使得截污干渠雨水收集率升高, 增加截污干渠通量运行负荷; 雨峰位置越靠后, 降雨历时越长, 前次与本次降雨时间间隔越长, 使得截污干渠污染物收集率降低, 降低截污干渠运行效率。当雨水收集率高而污染物收集率低, 表明干渠收集污染物效率低, 不利于截污干渠以及后续雨污水厂工作。所以, 污染物收集率最低和雨水收集率最高时为干渠最不利运行点。最后运用软件 Minitab 对响应面进行优化, 找到响应面处于极值点时即干渠最不利运行点的降雨条件: 雨峰位置为 0.75, 降雨历时为 1.82 h, 前次与本次降雨时间间隔为 72 h, 此时 SS 收集率为 42.85%, COD 收集率为 46.42%, TN 收集率为 56.34%, TP 收集率为

47.62%,雨水收集率为51.12%。

## 4 结 论

(1)滇池环湖截污干渠在“TN浓度阈值-液位/TN负荷通量”调蓄运行模式下,重现期为1a、雨峰位置为0.25~0.75、降雨历时为1~3h、前次与本次降雨间隔时间为2~72h时,干渠雨水收集率为44.32%~60.63%,SS、COD、TN、TP的收集率分别为42.80%~58.22%、46.42%~63.63%、56.34%~68.54%、47.62%~64.47%。在同一重现期下,不同典型降雨参数对雨水径流以及4种典型污染物收集率影响的平均波动幅度超过了15%。

(2)对于“TN浓度阈值-液位/TN负荷通量”调蓄运行模式下干渠的雨水收集率,雨峰位置、降雨历时、前次与本次降雨间隔时间3种降雨因素均影响显著;二次项中,仅有降雨历时的平方影响显著;交互项中雨峰位置与前次与本次降雨间隔时间交互影响显著。对于干渠的SS、COD、TN、TP4种污染物收集率,仅存在线性关系,雨峰位置、降雨历时、前次与本次降雨间隔时间3种降雨因素均影响显著。

(3)本研究建立了“TN浓度阈值-液位/TN负荷通量”调蓄运行模式下干渠的雨水收集率以及SS、COD、TN、TP4种污染物收集率与雨峰位置、降雨历时、前次与本次降雨间隔时间3种降雨参数的数学模型,可以利用该数学模型对干渠的雨水收集率以及4种污染物收集率进行辅助验证以及预测,为滇池环湖截污干渠雨洪管理提供依据。

### 参考文献:

[1] 彭竹葳. 基于SWMM的滇池环湖截污干渠(东岸段)的截流能力及运行状况分析[D]. 重庆:重庆大学,2014.

[2] 魏婷. 滇池东岸非点源污染负荷控制初探[D]. 重庆:重庆大学,2014.

[3] 陈水平,付国楷,喻晓琴,等. 城市雨水径流水质特征及应对方法[J]. 三峡环境与生态,2013,35(4):48-51.

[4] 方艳娟,姚娟娟,张智,等. 滇池环湖截污干渠错峰技术模拟与分析[J]. 水资源与水工程学报,2017,28(6):14-19+26.

[5] 蔡甜,詹健,肖存艳,等. 基于SWMM模型的不同气象条件下城市雨水径流污染特性分析[J]. 中国农村水

利水电,2017(11):69-73.

- [6] 马晓宇,朱元励,梅琨,等. SWMM模型应用于城市住宅区非点源污染负荷模拟计算[J]. 环境科学研究,2012,25(1):95-102.
- [7] RAN Qihua, SHI Zhinan, XU Yueping. Canonical correlation analysis of hydrological response and soil erosion under moving rainfall[J]. Journal of Zhejiang University Science A Applied Physics & Engineering, 2013,14(5):353-361.
- [8] DUNKERLEY D. Effects of rainfall intensity fluctuations on infiltration and runoff; rainfall simulation on dryland soils, Fowlers Gap, Australia [J]. Hydrological Processes, 2012,26(15):2211-2224.
- [9] 李文涛,隋军,刘成林,等. 设计降雨雨峰系数对排水管网设计流量的影响分析[J]. 净水技术,2015,34(5):100-103+111.
- [10] LIU Xilin, QIU Jinan, ZHANG Dalin. Characteristics of slope runoff and soil water content in benggang, colluvium under simulated rainfall[J]. Journal of Soils & Sediments, 2018,18(1):39-48.
- [11] YOO C, KIM J, YOON J. Uncertainty of areal average rainfall and its effect on runoff simulation: A case study for the Chungju Dam Basin, Korea[J]. KSCE Journal of Civil Engineering, 2012,16(6):1085-1092.
- [12] TORRES I B L T, AMATYA D M, SUN G, et al. Seasonal rainfall-runoff relationships in a lowland forested watershed in the southeastern USA [J]. Hydrological Processes, 2011,25(13):2032-2045.
- [13] 沈桂芬,张敬东,严小轩,等. 武汉降雨径流水质特性及主要影响因素分析[J]. 水资源保护,2005(2):57-58+71.
- [14] TEMPRANO J, ARANGOÓ, CAGIAO J, et al. Stormwater quality calibration by SWMM: A case study in Northern Spain[J]. Water Sa, 2005,32(1):55-63.
- [15] Rossman L A. Storm Water Management Model User's Manual[J]. 2009.
- [16] 胡晓惠,张智,姚娟娟,等. 滇池环湖截污干渠高效截流分析[J]. 给水排水,2016,52(4):113-117.
- [17] 谭明豪,姚娟娟,张智,等. 基于Morris的SWMM水质参数灵敏度分析与应用[J]. 水资源与水工程学报,2015,26(6):117-122.
- [18] BRANDVIK P J, DALING P S. Optimisation of oil spill dispersant composition by mixture design and response surface methods[J]. Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems, 1998,42(1-2):63-72.