

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2021.13.018

基于中心复合响应曲面法的生物滞留池参数优化

司艺方, 朱棣瑶, 冯国光, 叶晓东
(宁波市规划设计研究院, 浙江 宁波 315100)

摘要: 利用中心复合响应曲面法对生物滞留池性能进行水文模型试验,建立了雨量控制量和峰值变化率的响应预测模型,并对预测模型进行统计学检验。检验结果表明,各预测模型的显著性较高,试验值与预测值的拟合程度良好,同时给出了针对宁波市海绵城市水目标的参数取值建议。以有效性、经济性、目的性为优化原则,建议生物滞留设施土壤层导水率为 356 ~ 400 mm/h、表面下凹深度为 135 ~ 215 mm、设计停留时间为 12 ~ 24 h、设施服务面积为 12 ~ 20 倍,此条件下可以较好地达到目标效果。

关键词: 生物滞留池; 低影响开发; 响应曲面法; 海绵城市

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2021)13-0103-05

Parameters Optimization of Bioretention Pood Based on Central Composite Response Surface Methodology Design

SI Yi-fang, ZHU Qin-yao, FENG Guo-guang, YE Xiao-dong
(Ningbo Urban Planning & Design Institute, Ningbo 315100, China)

Abstract: Hydrological model tests were employed to investigate the performance of bioretention ponds by central composite response surface method, and a response prediction model of rainfall control and peak change rate was established and then verified by statistical tests. Significance of each prediction model was relatively high, and the test values were well fitted to the predicted values. At the same time, parameter values for Ningbo City to achieve sponge city water objective were suggested. Based on the optimization principles of effectiveness, economy and purposiveness, it was suggested that soil layer infiltration rate, subsurface concave depth, design retention time and service area of the bioretention facilities were 356 - 400 mm/h, 135 - 215 mm, 12 - 24 h and 12 - 20 times, respectively, and good performance of the bioretention facilities was achieved under this condition.

Key words: bioretention pood; low impact development; response surface methodology; sponge city

生物滞留池作为一项低影响开发(LID)技术,因其在雨水径流处理方面展现出良好的生物生态作用,目前已经在世界范围内得到了广泛应用。目前国内外对生物滞留池的研究主要集中在水文效应和水质改善这两方面^[1-2],随着研究的深入,近年来在其结构优化^[3]、处理机制^[4]、当地适应性^[5-6]、新材料应用^[7]和模型搭建^[8]等方面的研究显著增多。但采用优化算法对低影响开发设施进行优化设计的

研究极其有限,有关数学回归模型和水文模型的结合尚为空白。为系统合理、因地制宜地优化生物滞留池各层结构,笔者结合水文建模(采用 InfoWorks ICM 7.5 排水模型系统 Suds 模块)和响应曲面法两种技术手段,通过响应曲面法设计的试验方法可以快速建立数学模型,在给定条件下通过数学公式找到生物滞留池参数的最优组合方案,在合理范围内最大化生物滞留池性能。

1 设施结构概化

本研究采用的生物滞留池结构层由滞留层、土壤过滤层、储蓄层及底部排水系统组成^[9],如图1所示,该结构可代表一般生物滞留池的结构组成,同时对应了所采用模型模块中各层的结构。实际工程应用中,因工艺、地域和需求的不同,生物滞留设施的结构层数量或有增减、构造简繁或有不同,但基本都可归并为以上4个结构层。

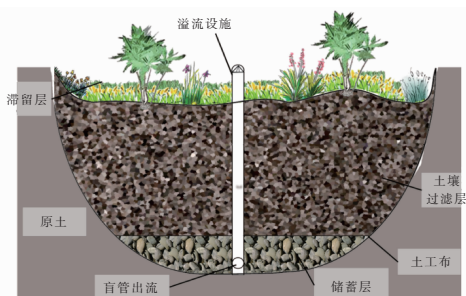


图1 典型生物滞留设施结构示意图

Fig.1 Schematics of typical bioretention system

当表层积水深度超过蓄水层深度时,雨水通过表层设置的溢流孔排出,渗入滞留带内部的水分则通过设置在底部的穿孔管排出。填料与原土接触面之间铺设防渗土工布,防止原土入侵或水分渗入其他地下结构。

模型软件中每个LID过程控制可通过对储蓄、渗透、蒸发等水文过程的模拟,结合ICM水力和水质模块,实现LID对场地径流量、峰值流量及径流污染控制效果的模拟(见图2)。

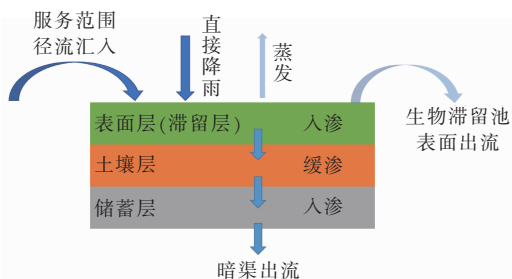


图2 ICM中Suds模块的生物滞留池模拟原理概化

Fig.2 Simulation principle for bioretention in ICM Suds control module

LID的水文过程模拟通过竖向层的组合来表示,其属性在单位面积基础上定义。这样方便在不同的集水区中灵活设定选取设施的规模面积。在模拟中,ICM进行水量平衡计算,记录各层的存储水量及各层机制间水量的交互。生物滞留设施在ICM

模型中概化为4个结构层:表面层、土壤层、储蓄层、暗渠层。要模拟LID对象,在ICM中的操作主要可分为全局设定(LID控制类型及对应参数)和场地设定(集水区中LID的组合方式)两个步骤。

2 试验部分

2.1 变量参数选择

LID系统应在对原有城市自然地貌改变较大的建设用地中去构建,主要是为了减小开发对自然生态带来的影响,包括水循环中的外排水量、水质以及循环方式,同时又兼顾了径流污染、径流峰值、雨水资源化利用等目标。对于宁波市而言,LID设施的主要功能为径流污染控制、径流总量控制、径流峰值控制三个方面,以满足水质、生态、水量三个方面的需求。

在径流污染控制方面,《海绵城市建设评价标准》(GB/T 51345—2018)中对源头减排项目实施有效性要求,新建项目和改扩建项目年径流污染总量(以悬浮物SS计)削减率不宜小于70%和40%;英国SUDS手册、美国LID手册以及国内的低影响开发指南中,典型的生物滞留池现场试验表明悬浮物去除率普遍可以达到70%~90%,在合理的参数范围内基本可以满足源头减排在径流污染削减方面的要求。因此本研究着重讨论对径流总量和径流峰值控制的优化。

宁波为典型的江南平原区,工程地质层以淤泥质粉质黏土与淤泥质黏土为主,土壤渗透能力差,地下水位较高,加之雨水入渗对建筑基础、道路结构也可能造成损害,因此生物滞留池一般设有防水土工布,不向原土渗透。为缓解城市土地资源紧张,城市地块设计建设时通常会充分利用地下空间建设停车场、设备用房等。地下室顶板覆土埋深一般情况下小于1.5m。地下室顶板覆土和排水管道的敷设限制了生物滞留设施的总体深度,设施总体高度不宜大于1.0m。

表面下凹深度、土壤层厚度、土壤层导水率、服务面积倍数、设计排空时间、孔隙率等参数均会影响生物滞留池性能。综合文献研究^[10-11],各因素中表面下凹深度 D_1 、土壤层导水率 K_1 、服务面积倍数 A 、设计排空时间 T 对生物滞留池性能的影响较大,且相关研究较少,因此将其作为本研究的参数变量。同时,结合宁波土壤特性、地下水位、地下空间开发、工程实践等因素,确定变量的取值范围,详见表1。

同时,以降雨控制量 Y_1 、峰值变化率 Y_2 代表生物滞留池的性能参数,其中, Y_1 为设施处理过的水量, Y_2 为经设施处理后场地径流峰值与场地开发前径流峰值的比值。

表1 模型参数设置

Tab.1 Model parameters for bioretention

参数名称	参数值	是否为变量
下凹深度 D_1/mm	100 ~ 300	是
表面粗糙度(曼宁值) N	0.25	否
斜率	0.01	否
土壤层厚度 D_2/mm	500	否
孔隙率 ϕ_1	0.45	否
田间持水量 F_c	0.15	否
蔫点 W_p	0.05	否
饱和导水率 $K_1/(\text{mm} \cdot \text{h}^{-1})$	50 ~ 400	是
吸入压头 ϕ/mm	60.96	否
储蓄层厚度 D_3/mm	150	否
储蓄层孔隙率 ϕ_2	0.5	否
渗透率 $K_2/(\text{mm} \cdot \text{h}^{-1})$	0(防渗土工布)	否
流量系数 C	1.21 ~ 4.86	是
流量指数 n	0.5	否
偏移高度 D_4/mm	25	否
服务面积倍数 $A/\text{倍}$	10 ~ 30	是

2.2 试验设计

试验采用响应面分析法中的中心复合设计(CCD)。选择表面下凹深度 D_1 、土壤层导水率 K_1 、服务面积倍数 A 、设计排空时间 T ,以及当地3 h短历时3年一遇降雨(如图3所示)为控制条件,以降雨控制量 Y_1 和峰值变化率 Y_2 为响应值,利用软件Design-Expert 8.0.6进行响应曲面试验,变量因素水平设置如表2所示。

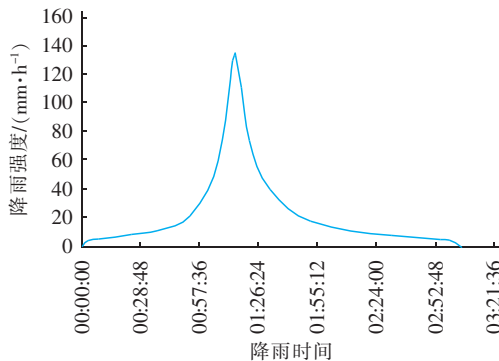


图3 宁波市3年一遇短历时降雨过程线

Fig.3 Short duration rainfall hydrograph with 3-year return period in Ningbo City

表2 变量因素水平

Tab.2 Experimental design levels of chosen variables

变 量	CCD 试验编码水平		
	低(-1)	中(0)	高(+1)
表面下凹深度 D_1/mm	150	200	250
土壤层导水率 $K_1/(\text{mm} \cdot \text{h}^{-1})$	137.5	225.0	312.5
设计排空时间 T/h	21	31	39
服务面积倍数 $A/\text{倍}$	15	25	30

3 试验结果与分析

3.1 试验结果

中心复合响应曲面法可以量化一个或多个测量的输出响应与输入因子之间的关系,为了确定输入因子与输出响应之间是否存在关系,需对采集的数据用最小二乘法建立拟合方程,并运用统计学方法进行统计学检验。通过对试验数据的分析处理,测得30组试验的降雨控制量 Y_1 和峰值变化率 Y_2 作为特定输出响应。对特定输出响应与4个输入因子之间分别存在的非线性或线性关系,用二次方程进行拟合分析。

非线性方程:

$$Y = \beta_0 + \sum_{i=1}^4 \beta_i x_i + \sum_{i=1}^4 \sum_{j=1, i < j}^4 \beta_{ij} x_i x_j + \sum_{i=1}^4 \beta_{ii} x_i^2 + \text{Error} \quad (1)$$

线性方程:

$$Y = \beta_0 + \sum_{i=1}^4 \beta_i x_i + \text{Error} \quad (2)$$

式中: Y 为输出响应; x_i 为输入因子; β_0 、 β_i 、 β_{ii} 和 β_{ij} 为回归系数; Error 为随机误差。对上述试验结果规范变量的回归系数进行最小二乘估计,得到在宁波3年一遇短历时降雨条件下,各自规范变量的回归方程如下:

$$Y_1 = -19.974 + 0.119 \times D_1 + 0.1845 \times K_1 + 0.209 \times T + 0.728 \times A + 9.677 \times 10^{-6} \times K_1 \times D_1 - 8.551 \times 10^{-4} \times K_1 \times T - 2.213 \times 10^{-3} \times K_1 \times A - 2.891 \times 10^{-5} \times D_1 \times T - 1.973 \times 10^{-3} \times D_1 \times A + 9.689 \times 10^{-4} \times T \times A - 1.915 \times 10^{-4} \times K_1^2 - 1.984 \times 10^{-4} \times D_1^2 - 9.356 \times 10^{-3} \times T^2 - 6.818 \times 10^{-3} \times A^2 \quad (3)$$

$$Y_2 = -45.6848 - 0.1505 \times D_1 - 0.0898 \times K_1 - 0.0170 \times T + 3.3333 \times A \quad (4)$$

回归方程中的参数估计后,需要对其拟合程度及其显著性进行检验分析。 Y_1 、 Y_2 的拟合方程对响应值的影响极显著($P < 0.01$),试验值和预测值之

间相关度分别为 $R_{Y_1}^2 = 0.8111$ 、Adj. $R_{Y_1}^2 = 0.8082$ ， $R_{Y_2}^2 = 0.9006$ 、Adj. $R_{Y_2}^2 = 0.9257$ ，可以用于响应值的预测。

3.2 响应面设计对响应值的影响

对降雨控制量 Y_1 的回归方程来说，一次项 D_1 、 K_1 、 A 及二次项 K_1^2 均达到极显著水平 ($P < 0.01$)，一次项 T 不显著 ($P > 0.05$)。根据 F 值的大小可以推断各因素对降雨控制量的影响程度为：土壤层导水率 K_1 > 表面下凹深度 D_1 > 服务面积倍数 A > 设计排空时间 T 。从回归方程可以看出，单因子表面下凹深度、土壤层导水率、服务面积倍数与降雨控制量呈正相关。

对峰值变化率 Y_2 的回归方程来说，一次项 D_1 、 K_1 、 A 达到极显著水平 ($P < 0.01$)，一次项 T 不显著 ($P > 0.05$)。从回归方程可以看出，单因子表面下凹深度、土壤层导水率与峰值变化率呈负相关，服务面积倍数与峰值变化率呈正相关。

3.3 生物滞留设施参数多目标优化分析

在海绵城市建设中，LID 设施建设的有效性、经

济性、目的性是三个重要原则。在设定目标下怎样选择合适的参数，从而以最少的经济投入达到目标效果十分必要。

根据《海绵城市建设技术指南——低影响开发雨水系统构建》对大陆地区年径流总量控制率的分区建议，宁波位于分区中的Ⅲ区，控制率为 75% ~ 85%，对应的设计降雨量为 20.7 ~ 30.2 mm；根据《浙江省海绵城市规划设计导则》，对宁波而言，该雨量包括不外排和处理后的雨水量，在本试验中即为降雨控制量。在该雨量下既可满足水质的管控，也可满足水量的管控。对径流峰值而言，最大减少峰值流量，减少对市政管网和河道的冲击为最佳。

对于多目标优化问题，要得到绝对最优解，从而使多个目标同时达到最优的情况往往是不存在的。因此，本次目标优化是在满足水质和水量控制的基础上，兼顾峰值削减的最大化，同时考虑到经济因素避免浪费建设，最大程度减小表面下凹深度和增大服务面积，利用 Design - Expert 软件分析得出较为合理的参数值范围，结果见表 3。

表 3 降雨控制量和峰值变化率目标优化

Tab. 3 Optimization of rainfall control and peak change ratio

水量目标/mm	参数取值				预测值			试验值	
	土壤层导水率/(mm·h ⁻¹)	表面下凹深度/mm	设计停留时间/h	设施服务面积倍数/倍	峰值变化率/%	降雨控制量/mm	理想度	峰值变化率/%	降雨控制量/mm
20.7	400	135	12	20	35.1	20.7	0.89	30.3	24.4
30.2	356	215	24	12	44.8	30.2	0.99	29.5	35.2

通过试验结果发现，当土壤层导水率为 356 ~ 400 mm/h、表面下凹深度为 135 ~ 215 mm、设计停留时间为 12 ~ 24 h、设施服务面积为 12 ~ 20 倍时，可以达到较为理想的水质、峰值、生态控制效果。

4 结论及建议

4.1 结论

本研究首次尝试将数学回归模型与水文模型两种手段相结合，以宁波市土壤地质条件为例，对生物滞留设施的水量和峰值控制进行了参数优化试验研究，同时兼顾了经济性和规划控制目标，提供一种可行的试验思路，通过较少的试验次数，建立数学模型公式，可对不同目标、不同建设条件下的最优方案进行求解。

4.2 建议

① 设施应用方面：本研究没有考虑设施内部结构堵塞而失去原有设计功能的因素，但对于宁波

这类多雨地区，堵塞对下渗速率的影响很大。对生物滞留池的结构再优化，需要在现有工程实例中收集相关堵塞问题，通过长期观察，逐步反映在日后的设计和运维中；而且对于设施的清理工作，需要有关部门完善监管制度，把责任落实到具体相关部门，增加设施的使用年限，防止设施堵塞造成设施无用甚至影响区域正常排水功能。

② 基础数据和监测数据方面：基础数据的完善和公开是各类研究的基础，但许多数据无法在设计时获取，只能采用参考的方式，一方面是场地的基础数据，包括土壤、地下水、降雨的实测数据，另一方面是长期的监测数据，特别是单个、单类设施的实测数据。建议各地对相近地质和降雨条件的区域进行划分，并尽快完善和公开必要的相关数据。

③ 设施结构方面：尽管多地出台了适用当地的海绵城市建设技术标准，但一般参照了国外的设施结构，建议对设施结构和介质材料开展深入研究，

尤其是结构层、填料、植物的选择,需要适应不同季节的气候以及空间范围,使设施性能在全年都能较为稳定,确保较好的应用效果。

④ 模型研究方面:a. 水文和水质模型。大部分的模型研究为某片区的低影响开发整体效果的评估,缺少参数设置的数据以及可参考性。模型类研究应在参数设置的整合、污染物去除机理、主流软件的参数设置和不同软件间的对接方向有所增加和倾向。b. 数学模型。各类数学模型和算法的优化可以避免常规决策的主观性和不确定因素,使决策者能根据实际情况选择合适的优化方案,是未来精准设计的重要研究方向。

参考文献:

- [1] 涂安国,李英,莫明浩,等. 基于 RECARGA 模型生物滞留池设计参数的水文效应[J]. 水土保持学报, 2020,34(1):149-153.
TU Anguo, LI Ying, MO Minghao, *et al.* Hydrological effects of design parameters optimization of bioretention facility based on RECARGA model[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2020, 34(1): 149-153 (in Chinese).
- [2] 毛月鹏,汪志荣,史怡然,等. 生物滞留池对屋面径流基本污染物的控制[J]. 环境污染与防治, 2020,42(1):29-34.
MAO Yuepeng, WANG Zhirong, SHI Yiran, *et al.* Control of basic pollutants in roof runoff by bioretention cell[J]. Environmental Pollution & Control, 2020, 42(1):29-34(in Chinese).
- [3] 林子增,何秋玫. 生物滞留池系统组成及工程设计参数优化[J]. 净水技术, 2019,38(12):116-121.
LIN Zizeng, HE Qiumei. Composition of bioretention system and optimization of engineering design parameters [J]. Water Purification Technology, 2019, 38(12): 116-121(in Chinese).
- [4] PALMER E T, POOR C J, HINMAN C, *et al.* Nitrate and phosphate removal through enhanced bioretention media: mesocosm study [J]. Water Environment Research, 2013,85(9):823-832.
- [5] 胡云进,王松,郜会彩. LID 措施组合的城市道路水文水质模拟与区域适应性研究[J]. 绍兴文理学院学报, 2020,40(1):1-8.
HU Yunjin, WANG Song, GAO Huicai. Study on urban road hydrological and water quality simulation and regional adaptability with LID measures [J]. Journal of Shaoxing University, 2020, 40(1): 1-8 (in Chinese).
- [6] KAZEMI F, BEECHAM S, GIBBS J. Streetscape biodiversity and the role of bioretention swales in an Australian urban environment[J]. Landscape and Urban Planning, 2011, 101(2):139-148.
- [7] BALTRENAITE E, BALTRENAS P, BHATNAGAR A, *et al.* A multicomponent approach to using waste-derived biochar in biofiltration: a case study based on dissimilar types of waste [J]. International Biodeterioration & Biodegradation, 2017, 119: 565-576.
- [8] WANG J, CHUA L H C, SHANAHAN P. Hydrological modeling and field validation of a bioretention basin[J]. Journal of Environmental Management, 2019, 240:149-159.
- [9] ROY-POIRIER A, CHAMPAGNE P, FILION Y. Review of bioretention system research and design: past, present, and future [J]. Journal of Environmental Engineering, 2010, 136(9):878-889.
- [10] 张海江,周绪旭,周大强,等. 储水式复杂型生物滞留设施的渗透系数试验研究[J]. 中国给水排水, 2019, 35(7):135-138.
ZHANG Haijiang, ZHOU Xuxu, ZHOU Daqiang, *et al.* Permeability coefficient test of complex bioretention system with internal water storage [J]. China Water & Wastewater, 2019, 35(7):135-138 (in Chinese).
- [11] LIU R, FASSMAN-BECK E. Hydrologic response of engineered media in living roofs and bioretention to large rainfalls: experiments and modeling [J]. Hydrological Processes, 2017, 31(3):556-572.

作者简介:司艺方(1991-),女,山东枣庄人,硕士,工程师,研究方向为市政工程。

E-mail:syfsy2007@sina.com

收稿日期:2020-04-22

修回日期:2020-07-09

(编辑:刘贵春)