

西安地铁鱼化寨车辆段灰绿组合雨水系统方案多目标优化^{*}

吕嘉杰

(南方科技大学环境学院, 518055, 深圳)

摘要 [目的] 城市化进程的加快, 城市洪涝灾害的频发, 对城市轨道交通车辆段雨水系统提出了更高的要求, 需对车辆段雨水系统方案进行详尽研究。[方法] 基于灰色基础设施与绿色基础设施组合管理雨水的概念, 利用 SWMM(暴雨洪水管理模型) 水文模拟软件对西安地铁3号线鱼化寨车辆段多种组合方案下的水文过程进行模拟。通过响应面法设计了多目标优化方法, 结合粒子群优化算法, 使用 Matlab 软件对车辆段内的绿色基础设施进行优化配置, 以实现径流总量、洪峰、TSS(总悬浮颗粒物)及成本的有效控制。[结果及结论] 通过多目标优化比选, 确定了西安地铁鱼化寨车辆段最优的灰绿组合雨水系统方案, 特别是透水铺装与调蓄池的组合布置, 应在车辆段内优先考虑。该方案在满足 GB 51345—2018《海绵城市建设评价标准》要求的同时, 也实现了经济效益的最大化。

关键词 城市轨道交通; 车辆段; 灰绿组合雨水系统方案; 多目标优化

中图分类号 U279.1

DOI:10.16037/j.1007-869x.2025.01.031

Multi-objective Optimization of Combined Gray-green Infrastructure Rainwater System for Yuhazhai Depot of Xi'an Metro

LYU Jiajie

(School of Environment, Southern University of Science and Technology, 518055, Shenzhen, China)

Abstract [Objective] Acceleration of the urbanization process and frequent occurrence of urban flood disasters impose higher requirements on the rainwater system of urban rail transit depots. It is necessary to conduct a detailed study on the schemes of the depot rainwater system. [Method] Based on the rainwater management concept by combining gray infrastructure and green infrastructure, the hydrological simulation software SWMM (storm water management model) is used to simulate the hydrological processes under various combination schemes for Yuhazhai Depot of Xi'an Metro Line 3. A multi-

objective optimization method is designed through the response surface method. Combined with the particle swarm optimization algorithm, the Matlab software is used to optimize the configuration of the green infrastructure within the depot in order to achieve effective control over the total runoff volume, peak flood, TSS (total suspended solids) and costs. [Result & Conclusion] Through multi-objective optimization and comparison, the optimal gray-green combination rainwater system scheme for Yuhazhai Depot of Xi'an Metro is determined. In particular, the combined layout of permeable pavements and retention ponds should be given priority within the depot. This scheme not only meets the requirements of GB 51345—2018 Assessment Standard for Sponge City Construction Effect, but also maximizes the economic benefits.

Key words urban rail transit; depot; gray-green combination rainwater system scheme; multi-objective optimization

随着城市面积的扩大, 不透水区域增加, 城市洪涝灾害频发, 造成巨大的经济损失^[1]。以混凝土和钢材为主的灰色基础设施作为城市排水系统的重要组成部分, 在城市防洪中发挥着重要作用^[1]。然而, 灰色基础设施面对快速城市化和气候变化引发的极端内涝缺乏弹性。同时, 城市雨水也作为一种可用的水资源, 应被收集利用。这些新问题强调使用绿色基础设施来保护、恢复或模拟自然水循环, 以提高城市抵御气候变化引发内涝的弹性^[1]。绿色基础设施的优势显而易见, 但考虑到极端暴雨期间城市的安全性, 它们不能完全取代灰色基础设施。因此在实践中, 绿色基础设施与灰色基础设施结合使用是值得研究的问题。根据 GB 55020—2021《建筑给水排水与节水通用规范》规定, 轨道交通车辆段需要设计雨水控制措施。如何比选最优方案成为亟须解决的工程难题。本文通过 SWMM(暴雨洪水管理模型) 对西安地铁3号线(以

^{*} 高水平专项资金项目(G03050K001)

下简称“3 号线”)鱼化寨车辆段灰色基础设施 + 绿色基础设施(以下简称“灰绿组合雨水系统”)进行建模,基于响应面法和粒子群优化算法使用 Matlab 软件设计多目标优化程序,比选车辆段最优灰绿组合雨水系统方案。

1 鱼化寨车辆段 SWMM 的建立

1.1 工程概况

3 号线鱼化寨车辆段位于西安市雁塔区科技西路,总占地面积 $10.58 \times 10^4 \text{ m}^2$ 。车辆段内部有检修库、运用库、综合楼、污水处理站、物资总库、洗车库及杂品库等建筑。车辆段所在区域年均降水量为 548.7 mm,年最大降水量为 829.7 mm,年最小降水量为 349.2 mm。对于灰色基础设施,本文仅调整调蓄池容积,不改变雨水管网系统;绿色基础设施则指常用的海绵城市措施。

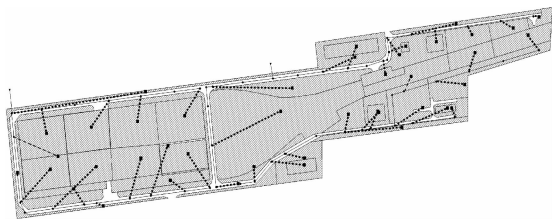
1.2 参数设置

利用 SWMM 水文软件将整个鱼化寨车辆段模拟简化为 42 个汇水分区,其中:55 个雨水检查井概化为 55 个节点,55 条雨水管道概化为 55 个管渠,设置左右两处雨水排放口。鱼化寨车辆段卫星图见图 1。鱼化寨车辆段 SWMM 见图 2。



图 1 鱼化寨车辆段卫星图

Fig. 1 Satellite image of Yuhuaizhai Depot



注:·表示排水检查井;■表示子汇水分区;---表示子汇水分区雨水流入的检查井。

图 2 鱼化寨车辆段 SWMM

Fig. 2 SWMM model of Yuhuaizhai Depot

本文采用西安市暴雨强度,采用芝加哥雨型,雨峰系数为 0.4。结合 GB 50014—2021《室外排水设计规范》与工程实际,选用设计重现期 $p = 10$ 年作为降雨设计重现期,由此构建 SWMM 概化模型。

西安市暴雨强度为:

$$j = \frac{13.265(1 + 2.915 \ln p)}{(t_0 + 21.933)^{0.974}} \quad (1)$$

式中:

j ——暴雨强度,单位 mm/min;

t_0 ——降雨历时,单位 min。

鱼化寨车辆段 SWMM 参数,如管径、管长、管道坡度、汇水区域划分及面积等根据实际工程确定,其余参数则参考《SWMM 用户手册》及相关文献确定^[2]。鱼化寨车辆段 SWMM 模型中的下渗模型选择 Horton 模型,其余参数取值见表 1。

表 1 鱼化寨车辆段 SWMM 参数取值

Tab. 1 SWMM parameter values of Yuhuaizhai Depot

参数	取值	参数	取值
最大入渗速率/ (mm/h)	75	不透水性洼地 蓄水深度/mm	2
最小入渗速率/ (mm/h)	3	管(渠)道 粗糙系数	0.013
衰减系数/ h^{-1}	4	地面坡度/%	5
透水性洼地 蓄水深度/mm	5	子汇水分区 特征宽度	\sqrt{A}

注: A 为子汇水分区面积。

1.3 灰绿组合雨水系统方案

鱼化寨车辆段分为左、右两个雨水汇水区域:左侧区域建有检修库和运用库,库区占用面积较大,可用于实施绿色基础设施的面积小;车辆段右侧区域包括股道区、综合办公区及其他建筑等,可用于实施绿色基础设施的面积较大,且可实施组合种类较多。因此本文选取鱼化寨车辆段右侧区域作为研究对象。根据实际场地情况对灰绿组合雨水系统方案进行规划,主要措施为:在建筑屋面布设绿色屋顶,在车辆段内部道路及轨道区域设置透水铺装,在车辆段内部布设下凹式绿地和植草沟,将这四种绿色海绵城市措施根据下垫面特点进行组合。其中:植草沟可用面积为 $0.53 \times 10^4 \text{ m}^2$,下凹式绿地可用面积为 $1.68 \times 10^4 \text{ m}^2$,透水铺装可用面积为 $2.61 \times 10^4 \text{ m}^2$,绿色屋顶可用面积为 $0.48 \times 10^4 \text{ m}^2$ 。此外,由于灰色基础设施调蓄池的容积较大,故选择在排水管网末端调蓄,并将其布置在排水口之前。调蓄池容积按文献^[3]进行设计,其中暴雨重现期按 10 年,场地径流系数按 0.65 考虑,故右侧区域调蓄池容积为 $1\,617 \text{ m}^3$ 。

本文将植草沟、下凹式绿地、绿色屋顶及透水

铺装等四种绿色海绵城市设施按照设计区域可用面积的15%、30%、45%、60%自由分配,形成40组绿色基础设施;同时将上述计算出的调蓄池容积按照设计容积的0%、20%、40%、60%、80%、100%分为6个方案(其中在调蓄池容积为0时,代表方案中仅有绿色基础设施,不含灰色基础设施)。对共计240组灰绿组合雨水系统方案进行SWMM模拟寻优。

2 多目标优化比选

2.1 指标评价及权重分析

2.1.1 环境指标

灰绿组合雨水系统方案的环境效能主要考虑实施措施后对城市轨道交通场段的水文和水力影响。根据GB 51345—2018《海绵城市建设评价标准》^[4],海绵城市设施需要达到水文水力要求,其中:水力效果主要以径流总量控制率和洪峰削减率表征,水文效果主要以出水口TSS(总悬浮颗粒物)削减率(以下简称“TSS削减率”)表征。

2.1.2 灰绿海绵城市设施全生命周期成本分析

全生命周期成本分析是指对从原材料成本、设计成本、施工成本及运行维护成本到最终废弃物回收的整个过程的现值成本进行评估分析。本文灰绿组合雨水系统的全生命周期成本包括建设施工成本、运行维护成本及项目残值等。利用全生命周期成本分析方法可获得鱼化寨车辆段灰绿组合雨水系统的全生命周期成本现值。

施工成本是工程建设初始阶段的设计成本、施工成本及占用土地成本。由于本文的研究对象是城市轨道交通车辆段,绿色基础设施为替换原有的建筑景观等专业设计的绿地、屋顶及道路,故不计算其占用土地的建设成本。运行维护成本包括维护成本和管理成本。残值 S_v 是指灰绿组合雨水系统使用寿命接近设计寿命时仍存在的可回收价

值^[5]。 S_v 的计算公式为:

$$S_v = \left(1 - \frac{L_A}{L_E}\right) C_{OM} \quad (2)$$

式中:

L_A ——最后一次维护工作到设计使用年限的时间间隔;

L_E ——灰绿组合雨水系统设计使用年限;

C_{OM} ——年运行维护成本。

在本研究中,假设所有灰绿组合雨水系统的后期维护间隔为1年1次,因此 L_A 取值为1年。

成本现值是指在整个生命周期内发生的所有成本按预定折现率折算到现在的价值。总成本的现值如下:

$$C_{PV,i} = C_i + \sum_{t=0}^n (f_{r,t} C_{OM,t}) - f_{r,n} S_{v,n} \quad (3)$$

$$f_{r,t} = \frac{1}{(1+r)^t} \quad (4)$$

式中:

$C_{PV,i}$ —— i 类灰绿组合雨水系统在第 n 年时的成本现值;

C_i —— i 类灰绿组合雨水系统在建设初期的投资;

$C_{OM,t}$ ——第 t 年的运行维护成本;

$f_{r,t}$ ——折现率 r 在第 t 年的现值系数,本文 r 取4.5%;

$f_{r,n}$ ——折现率 r 在第 n 年设计使用年限时的现值系数;

$S_{v,n}$ ——灰绿组合雨水系统在设计生命周期为 n 年时的残值。

不同绿色基础设施下鱼化寨车辆段全生命周期成本现值,见表2。其中,建设施工成本、运行维护成本及设计使用年限参考当地情况和文献^[6]确定,则得到调蓄池全生命周期成本现值为2 000元/ m^3 。

表2 不同绿色基础设施下鱼化寨车辆段全生命周期成本现值

Tab.2 Present value of full lifecycle cost for Yuhuaizhai Depot under different green infrastructure conditions

绿色基础设施名称	建设施工成本/ (元/ m^2)	运行维护成本/ (元/(m^2 年))	设计使用 年限/年	残值/元	全生命周期成本 现值/(元/ m^2)
下凹式绿地	60	3	15	2.8	94
绿色屋顶	190	15	15	14.0	302
透水铺装	400	20	15	18.7	625
植草沟	100	15	8	15.0	235

2.2 指标权重分析

确定权重的方法主要包括主观权重赋值法与客观权重赋值法两大类^[7]。客观权重赋值法是利用原始数据之间的关系,通过一定的数学方法来确定权重,其判断结果不依赖于人的主观判断。主观权重赋值法是根据专家对各个指标的理解,通过主观评价排序来确定权重的方法。为了避免两种权重赋值法的不足,本文选择主-客观权重赋值相结合的方法对定性指标和定量指标进行权重赋值:主观评价方法选用层次分析法,客观赋值法选用熵权法,综合考虑指标的变异大小和指标之间的冲突性来确定权重,通过计算得到主观权重和客观权重后,将两种权重确定方法的结果等比加权得到综合权重。各项指标的主观权重、客观权重及综合权重见表3。

表3 各项指标的主观权重、客观权重及综合权重

Tab.3 Subjective, objective and comprehensive weights of each indicator

指标	主观权重/%	客观权重/%	综合权重/%
径流总量控制率	35.07	28.49	31.78
TSS 削减率	18.93	21.44	20.18
洪峰削减率	10.93	32.25	21.59
全生命周期成本	35.07	17.82	26.45

2.3 决策变量

在灰绿组合雨水系统的优化配置中,决策变量指绿色基础设施中需要优化的控制量。本研究目标的前提是绿色基础设施布设面积不超过车辆段总面积的20%。为确定各灰绿组合雨水系统的最优布设比例,共选择5个多目标优化决策变量,包括4个绿色基础设施面积占比以及灰色基础设施体积占比。

2.4 目标函数

城市轨道交通车辆段灰绿组合雨水系统中各个单项设施的布设条件需根据各专业的的设计以及现场工程情况而定,同时需要满足 GB/T 51345—2018^[4]的要求。因此,研究选取径流总量控制率、TSS 削减率、洪峰削减率作为正向目标,而灰绿组合雨水系统的全生命周期成本则为负向目标。

根据本文所提综合权重法确定了4个指标的权重,因此最终的总目标函数为:

$$\max(F) = 0.3178\alpha + 0.2018\beta + 0.2159\omega - 0.2645\gamma \quad (5)$$

式中:

F ——总目标函数;

α ——量纲一的径流总量控制率;

β ——量纲一的 TSS 削减率;

ω ——量纲一的洪峰削减率;

γ ——量纲一的全生命周期成本。

本文选取的决策变量为各种灰绿组合雨水系统布局的比例,因而需要建立绿色基础设施面积比例、调蓄池容积比例与四个子目标之间的关系,其与径流总量控制率、TSS 削减率和洪峰削减率是非线性的,而成本计算方程是一个简单的自变量线性关系。研究选用 Design-Expert 软件利用响应面方法实现构建变量与子目标之间的关系。响应面法是通过适量的试验或模拟数据,通过适宜的数学模型和拟合方法,建立性能指标与影响因素之间的仿真模型^[8]。

本文选取的决策变量为各种灰绿组合雨水系统布局的比例,因此,需要建立绿色基础设施面积比例与调蓄池容积比例同四个子目标之间的关系模型。这些关系模型与径流总量控制率、TSS 削减率及洪峰削减率间呈非线性关系,而成本计算则是一个简单的自变量线性关系方程。

将 SWMM 软件模拟得到的240组灰绿组合雨水系统方案中的各方案的布设比例和成本作为自变量,其相应的径流总量控制率、TSS 削减率及洪峰削减率结果作为因变量,代入 Design-Expert 中的响应面法模块对离散点进行拟合。最终各分目标表达式为:

$$\begin{aligned} \alpha = & 0.1345 - 0.0290a + 0.0960b + 0.1387c + \\ & 0.3804d + 0.6756e + 0.0162ab - \\ & 0.0748ac - 0.0509ad - 0.0038ae + \\ & 0.0703bc + 0.0716bd - 0.1166be - \\ & 0.0136cd - 0.0875ce - 0.2630de + \\ & 0.1119a^2 + 0.0101e^2 \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \beta = & 0.0091 - 0.0672a + 0.0152b + 0.4009c + \\ & 0.4895d + 0.5175e + 0.4192ab - \\ & 0.0857ac + 0.1061ad - 0.0909ae - \\ & 0.1443bc + 0.7007bd - 0.1507be - \\ & 0.4733cd - 0.1549ce - 0.1036de - \\ & 0.0403a^2 - 0.0169e^2 \end{aligned} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} \omega = & -0.0633 - 0.0090a + 0.0104b + \\ & 0.1304c + 0.2917d + 1.62e - 0.1037ab - \\ & 0.1318ac - 0.0563ad + 0.0048ae + \end{aligned}$$

$$0.063\,0bc + 0.148\,8bd - 0.017\,9be + \\ 0.122\,2cd - 0.126\,6ce - 0.299\,5de + \\ 0.166\,3a^2 - 0.593\,9e^2 \quad (8)$$

$$\gamma = -0.220\,2 + 0.132\,5a + 0.168\,0b + \\ 0.838\,3c + 0.319\,1d + 0.345\,7e \quad (9)$$

式中:

- a ——植草沟布设面积比例,单位%;
 b ——下凹绿地布设面积比例,单位%;
 c ——绿色屋顶布设面积比例,单位%;
 d ——透水铺装布设面积比例,单位%;
 e ——调蓄池布设容积比例,单位%。

对响应面法拟合结果与 SWMM 模拟结果做方差分析与回归分析,结果对比见表 4。由表 4 可以看出:拟合方程与模拟结果之间的显著性小于 0.000 1,说明回归模型具有较强的显著性;决定系数和校正决定系数均大于 0.7,说明预测值具有较高的信度,可用于预测和优化分析。

表 4 各项指标方差分析与回归分析结果对比

Tab.4 Comparison of variance analysis and regression analysis results for each indicator

检验方法	指标	F 值	P 值	决定系数	校正决定系数
方差分析	径流总量控制率	70.622	<0.000 1		
	TSS 削减率	47.554	<0.000 1		
	洪峰削减率	64.721	<0.000 1		
回归分析	径流总量控制率			0.964 1	0.961 4
	TSS 削减率			0.903 3	0.895 9
	洪峰削减率			0.967 7	0.965 3

注:F 值为组间均方和组内均方的比值;P 值为判定假设检验结果的参数。

2.5 约束条件

一味追求灰绿组合雨水系统方案的全生命周期成本低廉,而忽略方案应该达到的水文水力控制效果,会导致雨水控制效果不佳。将植草沟、绿色屋顶、透水铺装及下凹式绿地的布设面积比例和调蓄池容积作为自变量(或约束条件),并且要求径流总量控制率、TSS 削减率及洪峰削减率均需满足 GB 51345—2018 中第 4.0.1 条^[4]的规定。约束条件为: $0.05 \leq a \leq 0.20$, $0.05 \leq b \leq 0.20$, $0.05 \leq c \leq 0.20$, $0.05 \leq d \leq 0.20$, $0 \leq e \leq 1.0$, $0 \leq a + b + c + d \leq 0.6$, $\alpha \geq 0.8$, $\beta \geq 0.5$ 。

约束条件的主要含义为各单项设施的布设比例不小于可用区域面积的 5%。为满足绿色基础设

施的多样性,不超过所适用区域面积的 20%,且 4 项绿色基础设施的占地面积总比例也不得超过车辆段研究区域总面积的 60%,受限于车辆段的性质,需对可以采用绿色基础设施的面积比例加以限制,以满足最小面积达到最优效果。同时,为满足 GB 51345—2018 要求,径流总量控制率不小于 80%,径流污染控制率不小于 50%。

2.6 多目标配置求解

本文采用粒子群优化算法对目标函数进行寻优。取式(6)中总目标函数的二次回归模型作为粒子群优化算法的适应度函数,每个子目标按式(7)一式(9)输入。粒子种群规模设为 500,最大迭代次数为 300。采用 Matlab 编程迭代求解优化目标。最优个体适应度-迭代次数关系曲线,如图 3 所示。

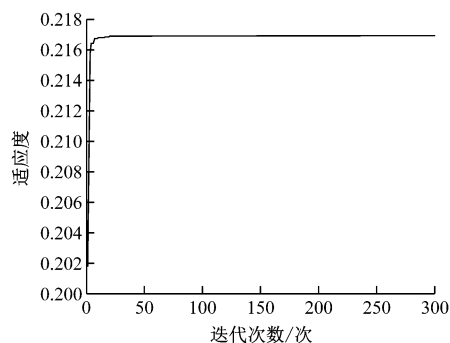


图 3 最优个体适应度-迭代次数关系曲线

Fig.3 Relationship curve between the fitness of the optimal individual and the number of iterations

由图 3 可见:最优个体经 56 次左右的进化后,适应度达到最大值 0.216 9。在 4 种绿色基础设施以及灰色调蓄池容积占比分别为 5%、5%、5%、15% 及 100% 时适应度达到最优解,且所有自变量取值范围都满足规定的约束条件。适应度为最优解时,径流总量控制率为 0.844, TSS 削减率为 0.582,洪峰削减率为 0.963,全生命周期成本为 437 万元。

3 最优方案分析

最优解所对应的径流总量控制率、TSS 削减率及洪峰削减率需满足约束条件要求。绿色措施中透水铺装的最优布设比例为约束上限,其他绿色措施的最优布设比例都为约束下限,其原因是在鱼化寨车辆段中,透水铺装的可用比例最大。而灰色设施中调蓄池的比例也需最大,因为调蓄池具有价格

低,以及雨水径流总量和洪峰控制效果好的特点。

将 Matlab 模拟的最优比例代入 SWMM 软件得到径流总量控制率、TSS 削减率及洪峰削减率。灰绿组合雨水系统最优方案模拟结果,见图 4。

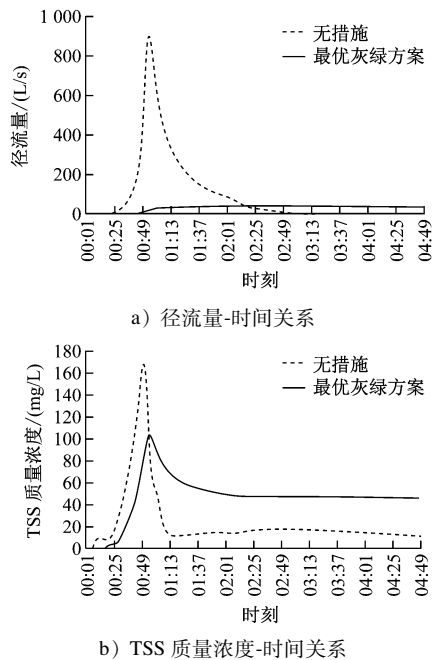


图 4 灰绿组合雨水系统最优方案模拟结果

Fig. 4 Simulation results of the optimal combined gray-green rainwater system scheme

Matlab 最优方案与 SWMM 最优方案模拟结果对比,见表 5。由表 5 可见:两种最优方案下,径流总量控制率相差 0.031 2,TSS 削减率相差 0.004 1,洪峰削减率相差 0.012 7。由此可见,基于响应面法的拟合结果与 SWMM 模拟结果的误差较小,验证了此方法的可用性。

表 5 Matlab 最优方案与 SWMM 最优方案模拟结果对比

Tab. 5 Comparison of simulation results of MATLAB and SWMM optimal schemes

项目	径流总量 控制率/%	TSS 削减 率/%	洪峰削减 率/%
Matlab 最优方案	84.44	58.20	96.30
SWMM 最优方案	81.32	58.61	95.03

4 结语

1) 针对城市化进程中城市轨道交通车辆段面临的洪涝灾害问题,提出了一种灰绿组合雨水系统的多目标优化设计方法。通过 SWMM 软件模拟和响应面法,结合粒子群优化算法,对 3 号线鱼化寨车

辆段的雨水控制措施进行了优化设计。

2) 灰色基础设施在洪峰调控和成本控制方面表现优异,而绿色基础设施提供了灵活的布局选项。灰绿组合雨水系统相较于单一设施在控制效果上具有显著优势,尤其是透水铺装与调蓄池的组合在车辆段内应优先考虑。

3) 本研究为城市轨道交通车辆段雨水控制设计提供了一种较为科学、系统的优化方法,确保雨水控制效果的同时,也实现了成本效益的最大化,对类似城市基础设施的雨水管理具有较好的参考价值。

参考文献

- [1] XU C, LIU Z, CHEN Z, et al. Environmental and economic benefit comparison between coupled grey-green infrastructure system and traditional grey one through a life cycle perspective[J]. Resources, Conservation and Recycling, 2021, 174: 105804.
- [2] 罗陶然. 基于 SWMM 模型的海绵城市径流量及水质模拟[D]. 西安: 西安工业大学, 2019.
LUO Taoran. Based on SWMM sponge urban runoff water quantity and water quality simulation[D]. Xi'an: Xi'an Technological University, 2019.
- [3] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑与小区雨水控制及利用工程技术规范: GB 50400—2016[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2017.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Technical code for rainwater management and utilization of building and sub-district: GB 50400—2016[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2017.
- [4] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 海绵城市建设评价标准: GB/T 51345—2018[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2018.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Assessment standard for sponge city construction effect: GB/T 51345—2018[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2018.
- [5] 彭祖平. 基于 SWMM 的灰绿基础设施组合方案优化与评价: 以嘉兴市西马桥小区为例[D]. 杭州: 浙江工业大学, 2020.
PENG Zuping. An optimization and evaluation on the combination scheme of gray-green infrastructure based on SWMM: a case study of a community in jiaxing city[D]. Hangzhou: Zhejiang University of Technology, 2020.
- [6] 彭晨蕊. 基于海绵城市理念的雨水系统规划设计优化研究[D]. 天津: 天津大学, 2017.
PENG Chenrui. Optimization of stormwater drainage system planning and design based on sponge city theory[D]. Tianjin: Tianjin University, 2017.
- [7] 李刚, 李建平, 孙晓蕾, 等. 主客观权重的组合方式及其合理性研究[J]. 管理评论, 2017, 29(12): 17.

(下转第 182 页)

表 4 方案优化前后车站公共区管线尺寸及系统切换模式

Tab. 4 Pipeline size and system switching mode in the station public area before and after scheme optimization

方案	公共区管线 数量/段	公共区管线尺寸/ (mm × mm)	公共区空调系统 切换阀门数量/个	切换模式
原方案	2	2 000 × 800	8	送风系统需单独设置, 回风与排烟共用路由
优化方案	2	1 600 × 500	10	回风系统需单独设置, 送风与排烟共用路由

注:公共区管线尺寸为长度 × 宽度。

表 5 方案优化前后经济性对比

Tab. 5 Economic comparison before and after scheme optimization

方案	复合风管工程量/m ²	耐火风管工程量/m ²
原方案	2 540	2 065
优化方案	960	2 560

置形式而言,站台公共区的气流组织分布性较差。

3) 将集中回风口单独设置在站台两端可有效优化气流组织,并减少公共区风管数量及尺寸。由于其方案的特殊性,在实际工程应用中,站台的空气需经站厅的回风以及站台的送风进行二次混合,故需将站厅、站台的送风配比进行适当调整,同时也需在系统调试、阀件材料及管材选型等方面提出更高要求。

参考文献

- [1] 赵红英,徐洪涛,胡观兴. 地铁站台公共区空调系统气流组织与热舒适性研究[J]. 城市轨道交通研究, 2015, 18(8): 98.
ZHAO Hongying, XU Hongtao, HU Guanxing. Airflow pattern and thermal comfort in the public area of subway platform[J]. Urban Mass Transit, 2015, 18(8): 98.
- [2] 唐易达,韩书琪,杨银灿. 基于低温送风的地铁站厅气流组织特性[J]. 西南科技大学学报, 2022, 37(4): 28.
TANG Yida, HAN Shuqi, YANG Yincan. Air distribution performance based on cold air distribution in subway station hall[J]. Journal of Southwest University of Science and Technology, 2022, 37(4): 28.

- [3] 刘凯凯. 地铁地下车站公共区卫生间通风气流组织优化研究[J]. 暖通空调, 2023, 53(12): 149.
LIU Kaikai. Optimization of ventilation air distribution of toilets in public areas of subway underground stations[J]. Heating Ventilation & Air Conditioning, 2023, 53(12): 149.
- [4] 沈凯,吴喜平,宋洁,等. 某地铁站厅不同送回风方式的气流组织数值模拟和分析[J]. 制冷技术, 2010, 30(1): 28.
SHEN Kai, WU Xiping, SONG Jie, et al. Numerical simulation and analysis of air distribution in subway station AC systems[J]. Refrigeration Technology, 2010, 30(1): 28.
- [5] 伍钊,余超,徐任泽,等. 基于病毒传播风险的地铁车厢通风系统优化研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2024, 21(6): 2241.
WU Fan, YU Chao, XU Renze, et al. Optimization study of subway carriage ventilation systems based on virus transmission risk[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2024, 21(6): 2241.
- [6] 苏志,李芄. 常州某会展中心空调系统方案模拟分析[J]. 洁净与空调技术, 2013(3): 1.
SU Zhi, LI Peng. CFD simulation of air conditioning system for an exhibition center at Changzhou[J]. Contamination Control & Air-Conditioning Technology, 2013(3): 1.

· 收稿日期:2022-07-29 修回日期:2022-12-05 出版日期:2025-01-10
Received:2022-07-29 Revised:2022-12-05 Published:2025-01-10
· 第一作者:冯绕,工程师,fengrao@dtsjy.com
通信作者:罗燕萍,正高级工程师,luoyanping@dtsjy.com
· ©《城市轨道交通研究》杂志社,开放获取 CC BY-NC-ND 协议
© Urban Mass Transit Magazine Press. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license

(上接第 174 页)

- LI Gang, LI Jianping, SUN Xiaolei, et al. Research on a combined method of subjective-objective weighing and the its rationality[J]. Management Review, 2017, 29(12): 17.
- [8] 王永菲,王成国. 响应面法的理论与应用[J]. 中央民族大学学报(自然科学版), 2005, 14(3): 236.
WANG Yongfei, WANG Chengguo. The application of response surface methodology[J]. Journal of the Central University for Na-

tionalities (Natural Science Edition), 2005, 14(3): 236.

· 收稿日期:2022-08-18 修回日期:2022-09-14 出版日期:2025-01-10
Received:2022-08-18 Revised:2022-09-14 Published:2025-01-10
· 通信作者:吕嘉杰,助理工程师,jiajielyu@163.com
· ©《城市轨道交通研究》杂志社,开放获取 CC BY-NC-ND 协议
© Urban Mass Transit Magazine Press. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license