

DOI: 10. 20040/j. cnki. 1000-7709. 2023. 20221393

基于 SPEA2 算法的绿色基础设施空间布局优化

廖向华^{1a}, 陈文杰², 郑嘉璇^{1a}, 黄国如^{1a, 1b}

(1. 华南理工大学 a. 土木与交通学院; b. 亚热带建筑科学国家重点实验室, 广东 广州 510640;
2. 华南农业大学水利与土木工程学院, 广东 广州 510642)

摘要: 以广州市天河智慧城为研究区, 针对绿色基础设施的最优成本效益问题, 采用出水口径流总量及悬浮物负荷总量两者的综合削减率、绿色基础设施全生命周期成本为优化目标, 设置土地利用现状为约束条件, 选择 SPEA2 为优化算法耦合 SWMM 模型进行绿色基础设施空间布局优化计算。结果表明, 随着降雨重现期增大, 绿色基础设施最优空间布局方案的可选择范围和综合削减率均在减小。下凹式绿地的成本效益最好, 绿色屋顶最差。当资金投入较低时, 可优先将下凹绿地的面积规划为可布设最大值后再规划其余设施; 若对径流量和污染物负荷量的削减要求较高且资金允许时, 可在其余绿色基础设施面积较大的基础上考虑绿色屋顶的布设。研究成果可为海绵城市建设示范工作提供理论支撑。

关键词: 成本效益; SPEA2; 空间布局优化; 绿色基础设施; SWMM

中图分类号: TV213.4 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-7709(2023)05-0144-05

1 概况

研究区位于广东省广州市天河区智慧城核心区域东部, 面积约 34 ha。根据汇水边界及排水管网分布, 研究区被划分为第 1、2、3 共 3 个排水分区, 面积分别为 11.31、5.91、16.63 ha。在研究区附近建筑物楼顶处安装雨量计, 雨水管网出口处安装流量计。将研究区划分为屋顶、道路、广场、绿地、林地共 5 种土地利用类型, 并对不同土地利用类型进行对应的绿色基础设施(GI)改造。其中, 屋顶改造为绿色屋顶(GR), 道路和广场改造为生物滞留池(BC)或透水铺装(PP), 绿地改造为下凹式绿地(SL), 而林地则不进行改造。排水分区划分、GI 可布设区域及流量计和雨量计的位置见图 1。GI 具有减少地表径流量、降低峰值流量、削减污染物负荷量等功能, 研究其空间布局优化技术可实现最优成本效益, 对高效解决城市水问题具有重大意义。研究初期通常于有限的 GI 布局方案中进行成本效益择优^[1], 但结果只是备选方案中的最优。近年来, 多目标进化算法^[2,3]在无限方案优化中的广泛应用使 GI 最优成本效

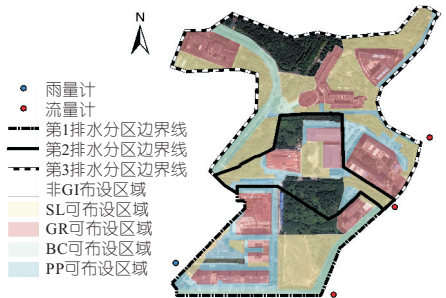


图 1 研究区内排水分区划分和 GI 可布设区域、雨量计及流量计分布

Fig. 1 Division of drainage zones and implementable area of GI and distribution of rain gauges and flowmeters in study area

益的实现成为可能, 其结果更趋近于全局最优方案。本文采用 SPEA2 算法耦合 SWMM 模型, 以水量水质的削减效果、GI 的全生命周期成本为目标优化广州市天河智慧城的 GI 空间布局, 并根据全局最优方案分析不同 GI 的成本效益, 以期为高度城市化地区的雨洪管理及海绵城市规划建设中的 GI 最佳效益问题提供参考。

2 研究方法

收稿日期: 2022-07-08, 修回日期: 2022-08-07

基金项目: 国家自然科学基金项目(52109018); 广东省自然科学基金面上项目(2022A1515010131)

作者简介: 廖向华(1997-), 女, 硕士研究生, 研究方向为水文水资源, E-mail: riruka971xh@163.com

通讯作者: 陈文杰(1991-), 男, 副教授, 研究方向为水文水资源, E-mail: wjchen@scau.edu.cn

2.1 SWMM 模型构建

2.1.1 SWMM 模型概化

分别构建 3 个排水分区的 SWMM 模型,见图 2,共有 60 个子汇水区(55 个子汇水区可进行 GI 布设),78 个雨水井,78 条雨水管道和 3 个出水口。

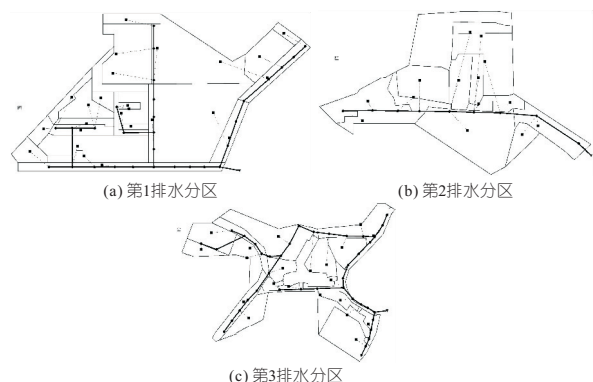


图 2 研究区 SWMM 模型概化图

Fig. 2 Generalization of SWMM in study area

2.1.2 SWMM 模型率定与验证

(1)水量模型参数。参考文献[4],以纳什效率系数 E_{NS} 、总径流量平衡误差系数 E_{QW} 和峰值流量相对误差系数 E_{PR} 为评价指标,量化水量模型模拟所得各出水口流量过程与实测流量过程的吻合程度。各评价指标的计算公式见式(1)~(3):

$$E_{NS} = 1 - \frac{\sum_{t=1}^N (q_{t,obs} - q_{t,sim})^2}{\sum_{t=1}^N (q_{t,obs} - \bar{q}_{obs})^2} \quad (1)$$

$$E_{QW} = \frac{\sum_{t=1}^N (q_{t,obs} - q_{t,sim})}{\sum_{t=1}^N q_{t,obs}} \quad (2)$$

$$E_{PR} = (|q_{p,obs} - q_{p,sim}| / q_{p,obs}) \times 100\% \quad (3)$$

式中, N 为实测流量数据数量; $q_{t,obs}$ 、 $q_{t,sim}$ 分别为 t 时刻的实测流量和模拟流量, m^3/s ; \bar{q}_{obs} 为平均实测流量, m^3/s ; $q_{p,obs}$ 、 $q_{p,sim}$ 分别为实测、模拟峰值流量, m^3/s 。

曾家俊^[4]已对第 1 排水分区进行 SWMM 模型参数率定与验证,且结果表明所构建模型精度较高,本文直接参考其成果确定第 1 排水分区参数。对第 2、3 排水分区,首先根据 SWMM 模型用户手册^[5]及文献[4]制定模型的初始模拟值,再采用试错法进一步调整。各排水分区参数取值与验证结果见表 1、2。

由表 2 可知,两个排水分区在率定期和验证期时,模拟值与实测值之间的纳什效率系数在 0.669~0.938 之间,总径流量平衡误差绝对值均小于 0.5,峰值流量相对误差均小于 25%,说明利用表 1 所示参数构建的 SWMM 水量模型准确可靠,模拟精度较高,在第 2、3 排水分区的径流模拟中具有较好的适用性。

表 1 水量模型参数取值

Tab. 1 Parameters of hydrology models

参数	排水分区编号		
	1	2	3
不透水区曼宁系数	0.013	0.011	0.015
透水区曼宁系数	0.600	0.100	0.700
不透水区洼地蓄水/mm	2.100	1.500	2.650
透水区洼地蓄水/mm	6.510	4.000	6.650
不透水区无填洼占比/%	30	30	50
最大下渗速率/($mm \cdot h^{-1}$)	115.510	90.000	130.550
最小下渗速率/($mm \cdot h^{-1}$)	1.725	1.300	2.300
衰减系数/ h^{-1}	6.100	7.000	6.700
干燥时间/d	10	10	10
管道曼宁系数	0.015	0.013	0.015

表 2 第 2、3 排水分区率定与验证期各评价指标结果
Tab. 2 Evaluation indices of the 2nd and 3rd drainage division zones in calibration and validation periods

排水分区编号	类别	降雨场次	E_{NS}	E_{QW}	$E_{PR}/\%$
2	率定期	20180527	0.813	-0.350	8.960
		20180530	0.902	-0.240	12.350
	验证期	20190604	0.938	0.010	23.260
3	率定期	20190624	0.910	-0.030	20.690
		20180514	0.839	0.300	23.420
	验证期	20180527	0.669	-0.470	14.940
		20180625	0.918	-0.050	9.520
		20180828	0.877	-0.290	13.790

(2)水质模拟参数。参考文献[4]确定第 1 排水分区悬浮物(SS)水质参数取值,见表 3。由于后续研究过程中没有采集更新的水质实测数据,第 2、3 排水分区的 SS 模型水质参数参考表 3 取值。

表 3 第 1 排水分区 SWMM 模型水质参数取值

Tab. 3 Parameters of quality models

类别	参数			
	最大累积量 /($kg \cdot ha^{-1}$)	半饱和累 积时间/d	冲刷 系数	冲刷 指数
屋顶	150	3	0.006	1.20
道路	200	1	0.003	1.30
绿地	200	4	0.007	1.35
停车场(广场)	150	2	0.005	1.25

2.1.3 降雨情景设置

根据《广州市中心城区暴雨公式及计算图表》^[6]中的广州市暴雨强度公式,选择 0.5、2、5、10 年一遇共 4 种设计暴雨重现期,设计降雨历时为 60 min,雨峰系数为 0.4,利用芝加哥雨型得到各设计暴雨重现期下的降雨过程。广州市暴雨强度公式为:

$$q = \frac{3618.427(1 + 0.438 \lg P)}{(t + 11.259)^{0.75}} \quad (4)$$

式中, q 为设计暴雨强度, $L/(s \cdot ha)$; P 为设计重现期, a ; t 为降雨历时, min。

2.1.4 GI 参数设置

结合现有装置^[7]、模型手册^[5]和文献[8],各

GI 在模型中的相关参数见表 4。

表 4 SWMM 模型中的各 GI 参数

Tab. 4 Parameters of GI in SWMM

GI 处理层	参数	GR	PP	BC	SL
表面层	滞留深度/mm	50.000	30.000	180.000	30.000
	空间植被覆盖率	0.200	0.000	0.200	0.200
	曼宁系数	0.150	0.110	0.150	0.150
	表面坡度/%	2.000	1.000	1.000	1.000
	厚度/mm		50.000		
路面层	孔隙率		0.150		
	不透水率		0.000		
	渗透率/(mm·h ⁻¹)		200.000		
	阻碍因子		0.000		
	厚度/mm	70.000	430.000	100.000	500.000
	孔隙率	0.472	0.472	0.472	0.472
	土壤持水率	0.150	0.100	0.150	0.100
土壤层	凋萎点	0.030	0.030	0.030	0.030
	水力传导度/(mm·h ⁻¹)	18.000	3.600	3.600	3.600
	水力传导坡度	10.000	10.000	10.000	10.000
	水吸力/mm	90.000	90.000	90.000	90.000
	厚度/mm		1.000	150.000	200.000
	孔隙率		0.430	0.430	0.430
	下渗率/(mm·h ⁻¹)		1.600	1.600	1.600
蓄水池	阻碍因子		0.000	0.000	0.000
	出流系数/(mm·h ⁻¹)		0.000	0.000	0.000
	出流指数		0.500	0.500	0.500
	管底抬高/mm		0.000	0.000	0.000
排水垫层	厚度/mm	20.000			
	孔隙率	0.430			
	曼宁系数	0.300			

2.2 多目标优化

以出水口径流总量及 SS 负荷总量两者的综合削减率、GI 总成本为目标函数，土地利用现状为约束条件，在 SPEA2 算法中调用 SWMM 动态链接库实现 GI 布设面积的自动优化，最终生成 GI 最优空间布局方案集。

2.2.1 SPEA2 算法

SPEA2 算法先通过适应度分配策略区分出种群的非支配个体，再用环境选择将优秀个体保留至下一代，以此引导种群不断往 Pareto 前沿逼近。本文设置 SPEA2 算法的种群规模为 100，进化代数数为 300，交叉概率为 0.9，变异概率为 1/55。

2.2.2 决策变量

在固定各类 GI 布设位置的基础上对 GI 的布设面积进行优化，决策变量为各子汇水区的 GI 布设比例 α 。根据《海绵城市建设技术指南——低影响开发雨水系统构建(试行)》^[9]，设定 α 的取值范围为 0~0.6，其中一个 GI 空间布局方案包含 55 个 α 。

2.2.3 目标函数

(1)GI 成本目标。采用全生命周期成本分析方法计算 GI 在建设阶段及生命周期内运营维护

所产生的总成本^[10]。考虑到土地成本远高于 GI 总成本，为突出 GI 总成本与效益的对比关系，忽略土地成本^[4]，又因为各 GI 的使用期限不同，故采用年平均法计算 GI 总成本。

研究区 GI 总成本目标函数 f_1 为：

$$f_1 = \sum_{a=1}^{n_G} S_a \alpha_a U_{UAAC_{b,a}} \quad (5)$$

式中， n_G 为研究区内可布设 GI 的子汇水区总数； S_a 为第 a 个子汇水区的面积， m^2 ； α_a 为第 a 个子汇水区中 GI 的布设比例； $U_{UAAC_{b,a}}$ 为第 a 个子汇水区内所含的第 b 种 GI 的单位年平均成本，元/($m^2 \cdot \text{年}$)。

对第 b 种 GI 的单位年平均成本 U_{UAAC_b} ，计算式为：

$$U_{UAAC_b} = P_{PVC_b} / n_b \quad (6)$$

$$P_{PVC_b} = I_{IC_b} + \sum_{t=0}^{n_b} f_{r,t} O_{OMC_b} - f_{r,n_b} S_{SV_b} \quad (7)$$

$$S_{SV_b} = (1 - v/n_b) O_{OMC_b} \quad (8)$$

$$f_{r,t} = 1/(1+r)^t \quad (9)$$

式中， P_{PVC_b} 为第 b 种 GI 在整个生命周期的单位成本现值，元/ m^2 ； n_b 为第 b 种 GI 的使用年限， a ； I_{IC_b} 为第 b 种 GI 的单位初期建设成本，元/ m^2 ； $f_{r,t}$ 为第 t 年折现率 r 的现值系数； O_{OMC_b} 为第 b 种 GI 每年的单位运营和维护成本，元/ m^2 ； f_{r,n_b} 为使用期限末年折现率 r 的现值系数，本文 r 取 0.5； S_{SV_b} 为第 b 种 GI 在使用结束时的单位残值，元/ m^2 ； v 为从上一个维修年到使用期限末年的间隔数，本文取 1 年。

GI 的生命周期成本可根据文献^[10]估算，取值见表 5。

表 5 GI 生命周期成本表

Tab. 5 Life cycle cost estimations of GI

GI 种类	初始建设成本	运营维护成本	残值	生命周期成本	使用年限/a	年平均成本
GR	744	97	92	2016	20	101
PP	587	6	5	626	8	78
BC	675	39	37	1 188	20	59
SL	82	1	1	98	20	5

注：初始建设成本、运营维护成本、残值、生命周期成本单位均为元/ m^2 ；年平均成本单位为元/($m^2 \cdot a$)。

(2)GI 效益目标。考虑研究区出水口径流和污染物总量等因素在 GI 布设前后的关系，以研究区的综合削减率为 GI 效益目标函数 f_2 。由于出水口径流和污染物总量呈正相关关系，对两者进行归一化处理，并各自赋予 0.5 的权重系数，此时 f_2 的取值范围为 0~100%。由于在研究区内仅对 SS 进行污染物采集及水质监测，采用研究

区出水口 SS 的排放总量变化代表出水口污染物在布设 GI 前后的变化。目标函数 f_2 为:

$$f_2 = \left(1 - \omega_v \frac{V_N}{V_P} - \omega_m \frac{m_N}{m_P}\right) \times 100\% \quad (10)$$

式中, ω_v 、 ω_m 分别为 GI 效益目标函数对径流和污染物的归一化权重系数; V_N 为布设 GI 后出水口的径流总量, m^3 ; V_P 为布设 GI 前出水口的径流总量, m^3 ; m_N 为布设 GI 后出水口的 SS 总排放量, kg; m_P 为布设 GI 前出水口的 SS 总排放量, kg。

综上所述, GI 空间布局优化的目标函数为:

$$\begin{cases} \min f_1 = \sum_{a=1}^{n_G} S_a \alpha_a U_{UAAc_b,a} \\ \max f_2 = \left(1 - \omega_v \frac{V_N}{V_P} - \omega_m \frac{m_N}{m_P}\right) \times 100\% \end{cases} \quad (11)$$

3 结果与讨论

3.1 SPEA2 算法的优化进程

采用算法的优化进程图表示随着迭代次数的增大,种群在目标空间中的位置向 Pareto 前沿逼近的情况,从而更直观地显现算法在寻优过程中的位变特性。SPEA2 算法在各降雨重现期下迭代 300 次的优化进程见图 3。

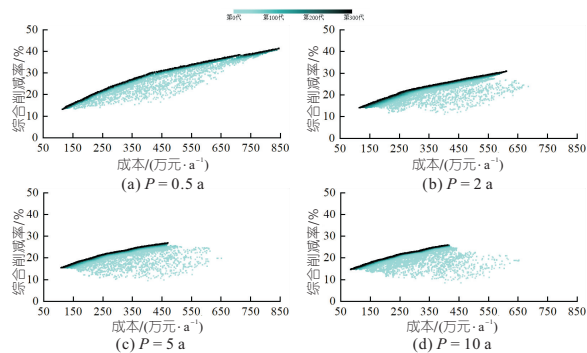


图 3 各降雨重现期下 SPEA2 算法的优化进程图
Fig. 3 Optimization process of SPEA2 under each rainfall recurrence period

将算法的优化进程分为三个阶段: ①初期。随着迭代次数的增大,种群分布从松散变得紧密,其不断向 Pareto 前沿逼近且速度较快。该阶段种群为浅色且分布最广泛,虽距离 Pareto 前沿较远但收敛迅速,算法的全局搜索能力表现突出。②中期。种群分布已较为紧密且距离 Pareto 前沿较近,收敛速度下降。③后期。此时算法的局部搜索能力表现突出,种群相互重叠的现象明显,图 3 中为深色基本覆盖浅色且深色为线形,说明种群已十分接近 Pareto 前沿且基本不再进化,取最终种群的非支配集为近似 Pareto 前沿。通过对比各前沿看出,随着降雨重现期的增大,GI 最

优空间布局方案集对径流量和污染物负荷量的综合削减效果减弱,其可选择的范围亦在减小。

3.2 GI 最优空间布局方案的成本分析

为得到各类 GI 的成本效益,对 GI 最优空间布局方案所对应的 GI 成本分配情况(图 4)进行分析。由图 4 看出,在各降雨重现期下,GI 总成本随综合削减率的增大而增大,其中 SL 成本基本不随综合削减率变化。而对于其余三种 GI,当综合削减率较小时,PP 和 BC 的成本均随着综合削减率的增大而增大,此时 GR 成本基本为 0,而后,BC 的成本先于 PP 达到稳定;当综合削减率较大时,PP 的成本基本维持稳定,此时 GR 成本从 0 开始迅速增大。由此可得,SL 的成本效益最好,在所有方案中 SL 的面积均基本达到可布设的最大值,而 GR 的成本效益最差,在综合削减率小的方案中基本不被使用。

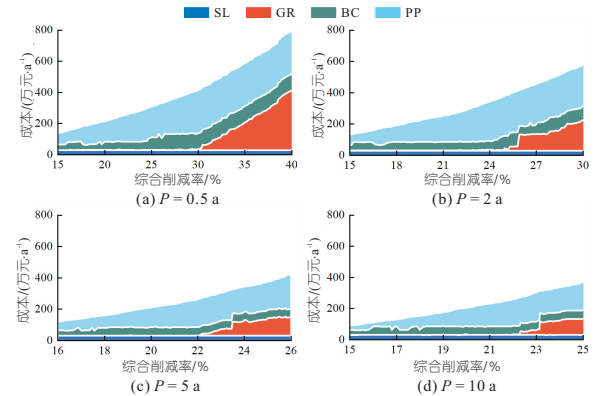


图 4 各降雨重现期下的 GI 最优空间布局方案所对应的成本堆积图

Fig. 4 The cost stack graphs for GI optimal spatial allocation schemes under each rainfall recurrence period

GR 成本效益最差的原因为: ①GR 的单位生命周期成本最高; ②GR 下垫面为屋顶,不具备直接下渗的功能,其收集的降雨不能通过下渗方式得到有效削减; ③本文的 GI 效益目标只考虑了研究区出水口径流和污染物总量,而 GR 削减洪峰的功能并未体现。

由图 4 看出,对于 GI 成本分配,当综合削减率较小时,PP 成本占 GI 总成本的主要部分,且其增长对 GI 总成本的增长起决定性作用。当综合削减率较大时,PP、GR 的成本在 GI 总成本中均占比较高,GR 成本的增长对 GI 总成本的增长起到决定性作用。由此可得,当资金投入较低时,为达到 GI 成本效益最大化,决策者可优先将 SL 面积规划为可布设最大值,再规划 PP 和 BC;随着资金的增加,可主要增大 PP 规划面积;若对径流量和污染物负荷量的削减率要求较高,在资金允许下,可在其余 GI 面积较大的基础上考虑 GR

的布设。

4 结 论

a. 随着降雨重现期的增大,GI 最优空间布局方案对径流量和污染物负荷量的综合削减效果减弱,其可选择范围亦在减小。

b. SL 的成本效益最好,GR 最差。当资金投入较低时,可优先布设 SL,在资金允许条件下再考虑布设 GR。

参 考 文 献:

[1] 朱培元,傅春,肖存艳. 基于 SWMM 的住宅区多 LID 措施雨水系统径流控制[J]. 水电能源科学, 2018,36(3):10-13.

[2] 李旦,叶长青. 基于耦合 SWMM 模型和 NSGA-II 算法的多目标低影响开发措施优化设计方法及应用[J]. 水电能源科学,2019,37(6):58-61.

[3] YU Y, ZHOU Y, GUO Z, et al. A new LID spatial allocation optimization system at neighborhood scale: Integrated SWMM with PICEA-g using MATLAB as the platform[J]. The science of the total environment, 2022, 831: 154843.

[4] 曾家俊. 基于解析概率方程与模型模拟的 LID 措施径流控制效应综合评价[D]. 广州:华南理工大学, 2020.

[5] ROSSMAN L A. Storm water management model user's manual, version 5.1[M]. Cincinnati: National Risk Management Research Laboratory, Office of Research and Development, US Environmental Protection Agency, 2015.

[6] 广州市水务局. 广州市中心城区暴雨公式及计算图表[M]. 2014

[7] 麦叶鹏. 基于多尺度试验、监测和模型模拟的低影响开发措施雨水径流控制效应研究[D]. 广州:华南理工大学,2021.

[8] 吴海春. 低影响开发雨水利用技术及其评估研究[D]. 广州:华南理工大学,2017.

[9] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 海绵城市建设技术指南——低影响开发雨水系统构建(试行)[Z]. 2014.

[10] MEI C, LIU J, WANG H, et al. Integrated assessments of green infrastructure for flood mitigation to support robust decision-making for sponge city construction in an urbanized watershed[J]. The science of the total environment, 2018, 639: 1394-1407.

Optimization of Spatial Allocation of Green Infrastructure Based on SPEA2

LIAO Xiang-hua^{1a}, CHEN Wen-jie², ZHENG Jia-xuan^{1a}, HUANG Guo-ru^{1a,1b}

(1a. School of Civil Engineering and Transportation; 1b. State Key Laboratory of Subtropical Building Science, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China; 2. School of Water Conservancy and Civil Engineering, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China)

Abstract: To maximize the cost-effectiveness of green infrastructure (GI) implementation, a pilot project in Guangzhou Tianhe Smart City was selected to conduct the study. Setting runoff volume reduction rate, suspended solids load reduction rate, and life cycle cost of GI as optimization objectives, SPEA2 was coupled with SWMM to obtain a series of GI optimal spatial allocation schemes with land utilization as the constraint condition. The results show that with the increase of the rainfall recurrence period, the integrated reduction rate and the range of the GI optimal spatial allocation scheme set gradually reduce. The sunken lawn (SL) is the most cost-effective GI while the green roof (GR) is the least. When the investment is low, the area of SL can be planned to the maximum before planning other GI. If the integrated reduction rate is high with sufficient funds, GR can be considered based on the large allocation area of other GI. The results can provide theoretical support for the implementation of the sponge city program.

Key words: cost-effectiveness; SPEA2; spatial allocation optimization; green infrastructure; SWMM

(上接第 112 页)

Numerical Simulation of Trapezoidal Channel Temperature Field and Lining Frost Heave Analysis Considering Solar Thermal Radiation

WANG Jian-you¹, SHI Peng-chao¹, LU Lin-fang², WANG Juan¹, LIANG Tai-li¹

(1. Yellow River Laboratory, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China; 2. Zhaokou Yellow River Diversion Irrigation District Phase II Project Construction Administration, Kaifeng 475008, China)

Abstract: Due to the lack of measured temperature on the channel surface, it is difficult to accurately simulate the channel temperature field. Considering the effect of solar thermal radiation on the temperature of the shady slope, sunny slope and bottom slab of the channel, a calculation model of channel surface temperature increase was established. The finite element software ABAQUS was used to simulate the temperature field change process of the channel and analyze the frost heave of the channel lining under the condition of three times of cooling. The results show that under the influence of solar thermal radiation, the freezing depth of the shady slope of the channel is significantly greater than that of the sunny slope and the bottom slab, the calculated freezing depth and the damage law of the lining are also in good agreement with the actual situation. During the cooling process, the concrete lining of the shady slope is more prone to frost damage than that of the sunny slope and the bottom slab, the same rule applies when calculated according to the multi-year maximum freeze depth utilization specification. The research results can provide new ideas for the temperature control and crack prevention design of channel concrete lining.

Key words: channel; concrete lining; solar thermal radiation; numerical simulation