

DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdtqk.2018.0036

李慧杰, 刘海星, 周惠成, 等. 针对人工海岛的低影响开发建设方案研究[J]. 南水北调与水利科技, 2018, 16(2): 38-44. LI H J, LIU H X, ZHOU H C, et al. Research on low impact development construction scheme of artificial islands[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2018, 16(2): 38-44. (in Chinese)

针对人工海岛的低影响开发建设方案研究

李慧杰¹, 刘海星¹, 周惠成¹, 冷祥阳²

(1. 大连理工大学水利工程学院, 辽宁 大连 116024; 2. 大连理工大学土木建筑设计研究院有限公司, 辽宁 大连 116024)

摘要: 为了研究人工海岛地区低影响开发(LID)方案设计对削减径流污染的效果和通过设置不同的 LID 设施增大雨水下渗从而降低土壤盐分的影响, 利用暴雨径流管理模型 SWMM, 设计不同目标导向的 LID 方案。通过 SWMM 模型中的水质模块分析研究径流污染削减效果, 通过建立 SWMM 模型模拟后的雨水下渗量与地下水潜水层下层水位之间的函数关系对模型中的压盐效果进行分析。结果表明, 应根据 LID 设施的适建范围充分利用各类用地。绿色屋顶对屋面径流污染具有较好的削减作用, 生态草沟对道路径流污染有较好削减作用, 透水铺装增加雨水下渗以及压盐效果最优, 另外设置具有错峰排水功能的雨水罐可取得较好的下渗效果, 旨在为人工海岛雨水资源利用规划提供决策依据。

关键词: 人工海岛; 低影响开发; 径流污染; 压盐; 雨水资源利用

中图分类号: TV 213.9 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-1683(2018)02-0038-07

Research on low impact development construction scheme of artificial islands

LI Huijie¹, LIU Haixing¹, ZHOU Huicheng¹, LENG Xiangyang²

(1. School of Hydraulic Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China;

2. The Design Institute of Civil Engineering & Architecture, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

Abstract: In order to study the effects of low impact development (LID) design on runoff pollution reduction and the effects of increasing rainwater infiltration by LID facilities on soil desalination in artificial island area, we designed LID configurations for different goals using the rainfall runoff management model - SWMM. We investigated the runoff pollution reduction effect using the water quality model in SWMM. The salt suppression effect in the model was evaluated in terms of the relationship between infiltration amount and shallow water table. The results showed that the LID facilities have a significant impact on pollution reduction. Green roof performs well in reducing runoff pollution from the roofs. Ecological grass swale has a good effect on reducing the road runoff pollution. Permeable pavement is the best at increasing rainwater infiltration and reducing soil salinity. Rainwater tank with off peak drainage function has a good infiltration effect. This paper provides a decision making basis for planning the use of LID for water resources management on artificial islands.

Key words: artificial islands; low impact development; runoff pollution; salt suppression; utilization of rainwater resources

随着我国沿海城市社会经济的发展及人口的增加, 陆地资源短缺成为制约发展的主要因素。从 20 世纪 50、60 年代到本世纪初, 我国填海面积达到

12 000 km²[1]。填海在解决陆地资源短缺的同时, 也导致了一系列的生态问题[2]。对于填海地区而言, 一般都面临着生态环境脆弱, 土壤盐渍化等问

收稿日期: 2017-07-26 修回日期: 2017-11-17 网络出版时间: 2018-01-10
网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20180108.1746.014.html>
基金项目: “十三五”国家重点研发计划项目(2017YFC0406005)

Funds: National Key Research and Development Program of China during the Thirteenth Five year Plan Period(2017YFC0406005)

作者简介: 李慧杰(1992-), 女, 山东东营人, 主要从事水文与水资源方面研究。lihuijie@mail.dlut.edu.cn

通讯作者: 周惠成(1958-), 男, 吉林长春人, 教授, 博士生导师, 长期从事水文学及水资源方面研究。hczhou@dlut.edu.cn

题^[3]。在人工海岛建设后期,由于海水入侵,地下水水位过高,导致树木难以存活。另外,随着海岛城市化发展,径流污染已经成为一项不可忽视的面源污染。因此人工海岛设置低影响开发设施的需求,应集中在回补地下水降低土壤盐分和加大自然净化降低径流污染上,从而改善海岛生态环境。

LID 是 20 世纪 90 年代末发展起来的暴雨管理和面源污染处理技术,旨在通过分散的、小规模源头控制来达到对暴雨所产生的径流和污染的控制,使开发地区尽量接近于自然的水文循环,其关键在于原位收集、自然净化、就地利用或回补地下水^[4]。我国针对低影响开发(LID)的研究进展较多,但针对人工海岛 LID 建设研究较少。汤伟真等人以深圳市国际低碳城启动区市政道路设计为例,探讨了采用 SWMM 模型进行市政道路 LID 雨水系统设计的技术方法^[5]。熊贇等人以深圳市某已建的 LID 居住小区为例,运用 SWMM 模型模拟研究了 LID 设施对水量和水质的控制效果^[6]。王坤等人利用 SWMM 模型,采用控制变量法确定了渗渠规模与透水率之间的定量补偿关系^[7]。但总体而言,LID 设施研究主要集中于城市中单一下垫面或者单个 LID 设施效果研究。本研究以人工海岛为对象,运用 SWMM 模型,通过面向不同目标的 LID 方案设计,分析不同方案对促进雨水下渗降低土壤盐分和促进自然净化削减径流污染的效果,从而推选出适合解决人工海岛问题的低影响开发方案。

1 人工海岛 LID 方案的关键问题研究

1.1 方案设计思路

本研究将控制目标界定为截污控制目标和压盐控制目标,并且为了增加方案的可行性,同时考虑成本控制目标。以规定的年径流总量控制率作为约束条件^[8],结合国家排水规范、拟建区开发要求、建设能力等进行综合分析。

首先,利用 SWMM 对 LID 改造前工况进行模拟,评估径流污染和地下水位情况;其次,结合拟建区规划设计要求及区域特征,针对各控制目标设计方案,对各个方案进行 LID 组合设施比选,进行初步布局。LID 设施的初选取决于研究区域的适建条件,具体包括设计位置的场地条件、土壤性质、地形地势、下垫面性质和空间需求等。参考国外雨水管理导则和国内 LID 设施的实践经验,整理了几种常见 LID 设施的特征指标^[9],如表 1 所示;然后,对不同目标导向的方案进行初步 LID 设计模拟结果对比,如果未达到规定的年径流总量控制率,则在适建

范围内优化 LID 初步布局方案,反复模拟调整,直至优化后的结果达到各方案最优目标。

表 1 LID 特征指标

Tab. 1 Indicators of LID facilities

LID 设施	适建范围	运行寿命/a	空间需求	维护要求	坡度	其他要求
透水铺装	道路	5	小	低	< 0.01	布置于非机动车道
绿色屋顶	建筑与小区	10	小	低	< 0.04	坡度小的平屋顶
下沉式绿地	公园与绿地	30	中	低	< 0.05	绿地深度< 0.20 m
生物滞留设施	公园、小区	10	小	中	< 0.12	距离建筑> 6 m, 距离道路< 30 m
雨水桶	建筑与小区	15	小	低	—	距离建筑< 10 m
生态草沟	道路	5	中	低	< 0.03	距离建筑> 3 m
渗透沟渠	道路	5	中	高	< 0.15	离建筑> 6 m, 离硬化下垫面> 6 m
渗透塘	公园与绿地	10	中	中	< 0.15	距离水体> 30 m, 最高水深< 0.6 m

1.2 方案实施效果评价方法

成本控制目标可将各项措施的运行寿命按最小公倍数法统一时间长度衡量,截污控制目标由 SWMM 模拟后各方案子汇水区污染物削减总量考量,压盐控制目标通过建立雨水下渗量与潜水层下层水位之间的关系量化。前两项可由 SWMM 模拟后的结果整理计算得出,后一项需要建立雨水下渗与潜水层水位之间的压盐模型。

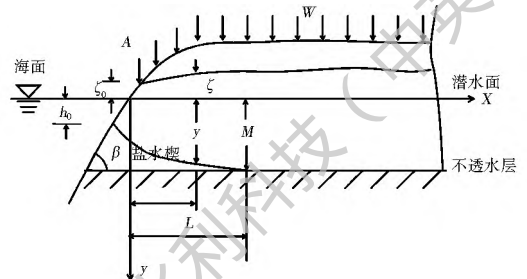


图 1 潜水层与海水作用关系

Fig. 1 Relationship between phreatic water and sea water

海岸附近地下含水层中维持一种从陆地向海洋流动的淡水层和从海洋入侵陆地的盐土层之间互相重叠的平衡状态^[10],如图 1 所示。假设海岛的含水层是均质并各向同性的,底部不透水层为水平面。取海水面与海岸交点为坐标原点,并定出相应 x 轴和 y 轴。由于潜水流是稳定渐变渗流,对于渐变渗

流根据其特性,任意断面单宽下渗量 q 可表示为:

$$q = K(y + \zeta) \frac{d\zeta}{dx} \quad (1)$$

式中: K 为含水层渗透系数,取为 $5.787 \times 10^{-4} \text{ m/s}$; x 为岛屿内部距海岸的距离; y 为咸、淡水交界面在海水面以下深度; ζ 为潜水面在海水面以上高度。

根据咸、淡水交界面静力平衡关系,有 $\zeta + y = (\rho_x/\rho_f)y$, 即

$$\zeta = (\Delta\rho/\rho_f)y \quad (2)$$

式中: ρ_x 、 ρ_f 、 $\Delta\rho$ 分别为海水、淡水密度以及两者之差,可取 $\rho_x = 1.025 \text{ g/cm}^3$ 、 $\rho_f = 1.0 \text{ g/cm}^3$ 。将式(2)代入式(1),积分并整理后得

$$y^2 = \frac{2q\rho_f}{K\rho_x \Delta\rho} X + C \quad (3)$$

式(3)可根据 Henry 试验资料确定积分常数 $C^{[11]}$, 因此式(3)可写成

$$y^2 = \frac{2q\rho_f}{K\rho_x \Delta\rho} X + 0.55 \left[\frac{q\rho_f}{K\rho_x \Delta\rho} \right]^2 \quad (4)$$

式(4)建立了任意断面单宽下渗量 q 与该断面处潜水层下层水位之间的关系。由式(4)可知咸、淡水交界面的纵剖面是一条抛物线,可用此模型衡量压盐效果。

1.3 模拟计算方法

(1) 模型选择与概化。

目前应用较广泛的雨洪模型有 FEQ、BASINS、MIKE、SWMM 等^[12]。本研究在模拟雨水管理设施效能时,需要兼顾水文、水力以及水质 3 个方面。其中,FEQ 模型适合模拟单场降雨,无法进行水质模拟,BASINS 只能进行水文模拟,无法进行水力计算。另外,LID 设施的模拟必须能精确的描述区域开发前和开发后的状态,MIKE 无内置 LID 模块,不适于 LID 设施模拟,而 SWMM 模型兼具以上两种功能。SWMM 主要用于模拟城市某个单一降雨事件或长期的水质、水量变化情况,可模拟流域内非点源污染负荷的产生、累积、冲刷和输移过程,以及在降雨条件下,地表的产汇流过程和管网沟渠中的输送过程^[13]。

主要利用 SWMM 模型中的水文、水力和水质模块。在水文模块中,对模型结果影响不敏感的参数例如温度、风速等可忽略不计^[14];在水力模块中,主要模拟雨水在排水管道中的汇流过程,不考虑污水或者管网节点集中流量的影响;在水质模块中,将土地利用类型概化成建筑、绿地和道路三类,分别给出不同的累积和冲刷函数描述污染过程^[15]。

(2) 日降雨数据分解。

降雨过程采用实测的日降雨数据,蒸发过程采用对应的日蒸发量。由于要比较下渗作用对地下水位的影响,因此选择长历时降雨序列。降雨量、降雨强度、降雨历时对下渗作用效果影响极大,采取日降雨量序列相当于把场次降雨均化到 24 h 内。为了保证结果的准确性,利用 NetSTORM 软件将日降雨量分解成 1 h 短历时降雨量。

NetSTORM 是对降水数据评估和城市径流模拟的计算机程序,其中的时间序列聚集和合成分解模块可将日降雨转换成小时降雨。该模型是由一个双链混合模型(干湿序列)和自相关抖动(强度过程)模型构成的。首先该区域利用有限的精确的小时降水数据估计区域参数^[16],以描述该区域的雨水特性;然后由给定的日降雨时间序列和二进制表示的干湿序列推导出日降雨统计数据(平均,方差和干燥概率),以适应季节性^[17];最后可选择利用随机配对过程、连续确定过程和连续随机过程进行日降雨量的小时分解。随机配对过程利用累积密度曲线通过随机搜索的方式获取最优解。连续确定过程利用问题的解析性质,产生确定的有限或无限点序列使其收敛于全局最优解。连续随机过程根据已有数据的资料,以概率的形式来描述降雨规律。受资料所限,最终选取连续随机过程。

2 案例分析

2.1 区域概况

研究区域位于大连新机场填海区,面积约 6.3 km^2 ,各个用地类型见图 2。属于渤海海岸段,地形平坦,填土以棕壤为主。高程位于 $4.2 \sim 8.73 \text{ m}$,中间高,四周低。属大陆性气候范畴,又具有季风气候特征,年均降水量 622 mm 。管网服务区域面积为 4.1 km^2 ,采用雨污分流制,由 159 个雨水管道、174 个检查井、11 个出水口和 174 个汇水区组成。

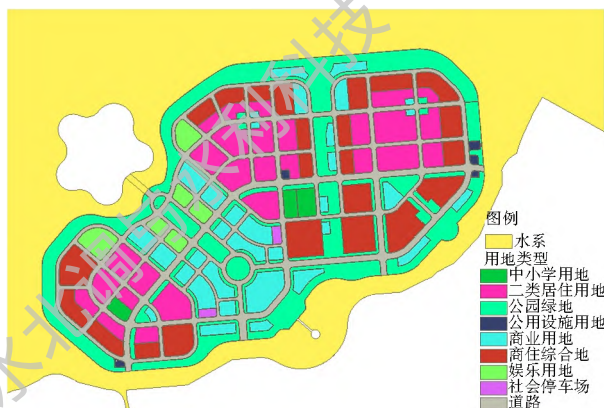


图 2 研究区基本情况

Fig. 2 Basic situation of the study area

对研究区进行 SWMM 建模,采用大连市 2015 年 5 月 30 日- 2016 年 5 月 30 日降雨、蒸发资料,经 NetSTORM 软件分解为 1 h 降雨数据。子汇水区模块中面积、坡度、不透水面积率等参数按照实际选取,曼宁系数、洼地蓄水深度等参数参考相关文献设定^[18],初设不透水部分地表水流的曼宁系数为 0.012,洼地蓄水深度为 1.2 mm;透水部分地表水流的曼宁系数为 0.15,洼地蓄水深度为 2.5 mm。下渗模拟采用霍顿方程,最大下渗速率取 76.2 mm/h,最小下渗速率取 3.18 mm/h,衰减系数取 4.12/h^[19]。SWMM 水质模型中采用指数形式的污染物累积方程和冲刷方程,各个参数取值见表 2^[20]。建模概化见图 3。

表 2 水质模型主要参数及初始值

Tab. 2 Main parameters and initial values of water quality model

土地利用类型	参数类别	参数	初始值
路面	街道清扫	街道清扫去除效率	0.3
	污染物累积	最大累积量/(kg·hm ⁻²)	6.27
		累积速率常数/d ⁻¹	1.02
	污染物冲刷	冲刷系数	0.02
		冲刷指数	0.53
		街道清扫去除率(%)	58.53
绿地	污染物累积	最大累积量/(kg·hm ⁻²)	33.9
		累积速率常数/d ⁻¹	0.9
	污染物冲刷	冲刷系数	0.01
		冲刷指数	0.54
屋面	污染物累积	最大累积量/(kg·hm ⁻²)	16.44
		累积速率常数/d ⁻¹	0.31
	污染物冲刷	冲刷系数	0.09
		冲刷指数	1.76
污染物	污染物衰减	衰减系数/d ⁻¹	0.15
	降雨浓度	雨水中污染物浓度/(g·L ⁻¹)	0

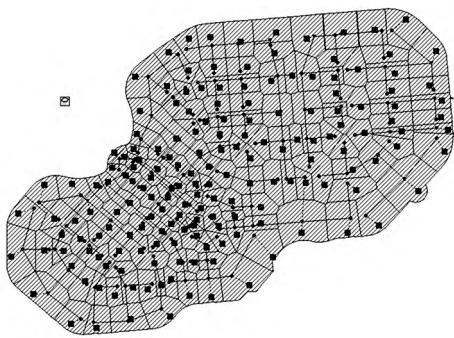


图 3 研究区 SWMM 建模概化图

Fig. 3 Generalization of SWMM modeling in research area

2.2 方案设计

初选透水铺装、绿色屋顶、下沉式绿地、生物滞留设施、雨水罐、生态草沟 6 种 LID 设施,其适建面

积分别为 76.96 hm², 134.09 hm², 171.48 hm², 55.72 hm², 92.86 hm², 23.38 hm²。

方案一:以成本控制目标最优为原则组成 LID 设施方案

根据各种设施的调研结果和国内有关项目设计资料,初选 LID 设施的基建费和管理维护费,见表 3^[21]。考虑到投资方的利益需要,LID 设施以低成本为主,最终选择绿色屋顶、下沉式绿地、雨水桶、生态草沟构成方案一。

方案二:以截污控制目标最优为原则组成 LID 设施方案

截污效能主要指 LID 设施削减径流污染物的能力。由于在城市径流污染物中,SS 往往与其他污染物指标具有一定的相关性,因此采用 SS 作为径流污染物的控制指标^[22]。径流污染物主要集中在道路和屋面上^[23],最终选择绿色屋顶、下沉式绿地、生物滞留设施、生态草沟构成方案二。

方案三:以压盐控制目标最优为原则组成 LID 设施方案

压盐效果主要通过 LID 设施增加雨水下渗量实现,利用式(4)建立雨水下渗量与潜水位之间的关系,衡量压盐效能。通过对 LID 设施下渗性的对比,最终选择透水铺装、下沉式绿地、生物滞留设施、雨水桶构成方案三。

方案四:以综合目标(兼顾成本目标、截污目标、压盐目标)最优为原则组成 LID 设施方案

根据 LID 设施的适用范围,充分利用规划空间,以兼具各部分效能最佳的原则选择组合方案,最终选择透水铺装、绿色屋顶、下沉式绿地、雨水桶构成方案四^[24]。

在适建范围内分别以成本、截污效果以及压盐效果为目标,以达到 80% 的年径流总量控制率作为约束条件,首先在解决多目标问题的过程中先根据表 3 确定各个方案拟建的 LID 设施,然后在各个方案的适建范围内通过不断优化试算,得到各个 LID 设施的最佳适建面积,最终确定的各方案 LID 设施及面积见表 4。

表 3 LID 设施各项指标对比

Tab. 3 Comparison of LID facilities by various indicators

LID 项目	建造成本 /(元·m ²)	维护成本 /(元·(m ² ·a) ⁻¹)	SS 去除 率(%)	下渗性
透水铺装	210~ 1000	2.4~ 15	4.14	高
绿色屋顶	100~ 200	8~ 12	—	无关
下沉式绿地	40~ 50	6~ 10	34.32	高
生物滞留设施	150~ 400	10~ 30	3.21	较高
雨水桶	30~ 100	2~ 5	0.59	无关、但可设置错峰排水
生态草沟	30~ 200	4~ 8	15.35	较高

数据来源:SS 去除率由《低影响开发雨水管理措施的设计及效能模拟研究_威海军》中的实验数据所得。说明:成本在实际计算中取所列数据上下限的中间值。

表 4 LID 设施布设类型及面积

Tab. 4 Layout type and area of LID facilities

方案一		方案二		方案三		方案四	
LID 设施	面积/hm ²	LID 设施	面积/hm ²	LID 设施	面积/hm ²	LID 设施	面积/hm ²
绿色屋顶	74.80	绿色屋顶	93.49	透水铺装	61.98	透水铺装	49.92
下沉式绿地	112.82	下沉式绿地	127.22	下沉式绿地	110.28	绿色屋顶	74.80
雨水桶	81.73	生物滞留设施	48.22	生物滞留设施	42.08	下沉式绿地	91.58
生态草沟	9.36	生态草沟	17.06	雨水桶	37.40	雨水桶	56.10

2.3 模拟成果及分析

按照以上设计利用 SWMM 模型对各方案进行模拟,模拟后的成果见表 5。经分析,各 LID 方案设置后的径流连续性误差最大为 0.239%,污染负荷的输入输出误差最大为 0.01%,模型计算误差在合理范围内。

分别对各方案成本、截污以及压盐效果对比分析,方案一、二、三、四相比无 LID 设施时,下渗量分别增加了 2.6 倍、1.23 倍、3.06 倍、2.96 倍。LID 设施的添加增大了雨水下渗,各方案 LID 设施土壤层属性的设置是造成结果差异的最主要原因^[25],例如透水铺装、生物滞留设施等的土壤层中设置碎石或砾石层等多孔结构增大了雨水下渗,而绿色屋顶、下沉式绿地等 LID 设施根据实际情况不设置碎石土壤层。方案一、二、三、四相比无 LID 设施时,成本分别增加 7303.45 万元、81630.90 万元、228584.42 万元、177728.28 万元,成本差异主要与各个 LID 设施的单项成本以及建设面积不同有关。各方案污染物累积量分别较无 LID 设施时削减 81.95%、83.86%、67.82%、73.34%,SS 的削减主要受 LID 设施截留影响,土壤和植物根系的吸附、过滤、截留

作用是造成 SS 削减的最主要原因^[26]。

表 5 各方案模拟成果

Tab. 5 The simulation results of each scheme

比较项目	无 LID 设施	方案一	方案二	方案三	方案四
降雨量/mm	566.1	566.1	566.1	566.1	566.1
蒸发量/mm	92.3	171.4	264.7	125.3	151.7
径流量/mm	316.5	113.2	113.2	113.2	113.2
下渗量/mm	155.2	403.5	190.4	475.7	458.7
建设成本/万元	108300	115603.45	189930.90	336884.42	286028.28
子汇水区污染物累积量/kg	50834.1	9174.1	8226.3	16356.0	13551.4
海岛中心处咸淡水交界面在海水面以下深度/m	35.4	47.9	40.1	51.6	49.5

各方案成本对比见图 4,方案一和方案二中绿色屋顶成本占总成本比例最高,方案三和方案四中透水铺装成本占总成本比例最高,这主要与建筑面积设置较大有关。方案一中下沉式绿地的建筑面积最大,但因为单价较低,所以总体花费较少。方案二

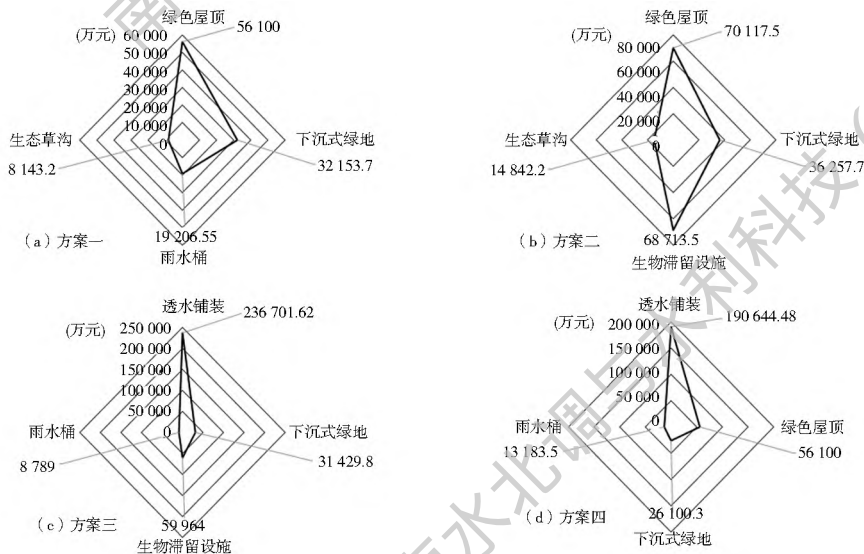


图 4 各方案单项成本与总成本比较

Fig. 4 Comparison of individual cost and total cost of the schemes

中生物滞留设施的单价约为绿色屋顶的两倍, 由于建筑面积较小, 所以成本低于绿色屋顶。方案三和方案四中, 透水铺装的使用年限较短、单价高并且建设面积较大导致了占总成本的比重很大。

对各方案子汇水区污染物负荷总量对比, 方案一和方案二的截污效果最明显, 究其原因, 主要有以下两方面: 一是均设置了较高比例的绿色屋顶, 因为屋面污染物晴天累积量较大且无法清扫, 在大、中强度降雨时, 易遭受冲刷。绿色屋顶可减少污染物的晴天累积, 在遭遇降雨时, 也可减小冲刷, 降低径流污染。二是均在道路两侧设置了生态草沟, 可充分拦截路面径流污染, 在转输雨水的同时, 滞留、净化部分污染物。方案三没有设置针对屋面的 LID 设施导致其污染削减效果相对较差。方案四虽然设置了部分绿色屋顶, 但没有设置生态草沟, 导致径流污染削减效果稍差。

从海岸到岛屿中心处潜水层水位变化见图 5。方案三和方案四均铺设了大面积的透水铺装对地下水位的改变较大, 在 6 项 LID 设施中透水铺装的下渗效果最好, 并且在非机动车道上铺设透水铺装可有效利用道路空间, 增加雨水渗蓄。方案二中的 LID 设施均以绿色植物为主, 一定程度上阻碍了雨水的直接下渗。压盐效果差异与选择的 LID 设施及适建面积有很大关系。例如方案一中, 采取绿色屋顶和雨水罐搭配使用的方法, 可将屋顶雨水经绿色屋顶净化后导入雨水桶收集, 充分利用屋顶或地下空间, 错峰下渗雨水, 也起到较好的下渗效果。

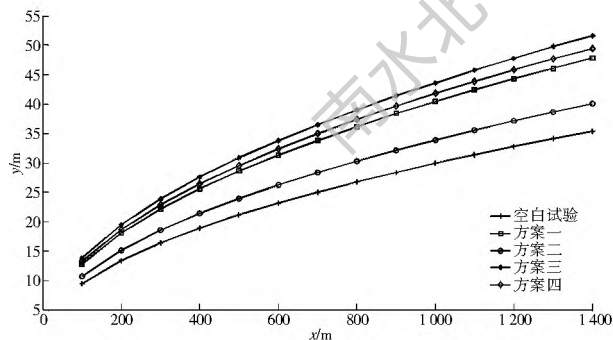


图 5 各方案潜水层下层水位曲线对比

Fig. 5 Comparison of water table curves of phreatic layer in different schemes

3 建议

本文参考国内外技术文献及项目资料, 在结合一定项目经验的基础上, 对不同目标导向的人工海岛 LID 方案优化。在雨洪模型 SWMM 的辅助下, 对大连新机场人工海岛进行 LID 方案设计及效果的模拟研究, 旨在为人工海岛雨水资源利用规划提

供决策依据。

综上所述, 建议推荐方案一作为研究区 LID 建设的优选方案。理由如下: 方案一成本最低, 污染物的削减效果仅次于方案二且两者差距不大, 压盐效果虽然相比方案三和方案四较差, 但是总体差别不大, 特别是距离海岸越近时, 压盐效果的区别越不明显。另外, 方案三得经济性不好, 方案四虽然成本和压盐效果较好, 但是截污效果比方案一差很多, 所以最终推荐方案一。

参考文献(References):

- [1] 韩丕龙. 填海新区海岸带景观生态化建设—以深圳前海合作开发区为例[D]. 济南: 山东大学, 2014. (HAN P L. The reclamation new area of coastal landscape ecological construction—An example of ShenZhen Qianhai cooperation coastal zone[D]. Jinan: ShanDong university, 2014. (in Chinese))
- [2] 冷悦山, 孙书贤, 王宗灵, 等. 海岛生态环境的脆弱性分析与调控对策[J]. 海岸工程, 2008(2): 58-64. (LENG Y S, SUN S X, WANG Z L, et al. Vulnerability analysis of island ecological environment and regulating measures[J]. Coastal Engineering, 2008(2): 58-64. (in Chinese)) DOI: 10. 3969/j. issn. 1002-3682. 2008. 02. 009.
- [3] 王琦. 填海造陆区水盐运移分析及数值模拟研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2016. (WANG Q. Analysis and numerical simulation research of water and salt migration in reclamation area[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2016. (in Chinese))
- [4] 顾晓鹏. 我国低影响开发存在的问题及对策研究[J]. 城市道桥与防洪, 2015(10): 153-156, 164, 21. (GU X P. Problem Existing in Low Impact Development in China and Study of Countermeasures[J]. Urban Roads Bridges & Flood Control, 2015, (10): 153-156, 164, 21. (in Chinese)) DOI: 10. 16799/j. cnki. csdqfh. 2015. 10. 047.
- [5] 汤伟真, 任欣欣, 丁年, 等. 基于 SWMM 的市政道路低影响开发雨水系统设计[J]. 中国给水排水, 2016(3): 109-112. (TANG W Z, REN X X, DING N, et al. Design of rainwater system with low impact development for municipal road based on SWMM model[J]. China Water & Wastewater, 2016(3): 109-112. (in Chinese))
- [6] 熊赞, 李子富, 胡爱兵, 等. 某低影响开发居住小区水量水质的 SWMM 模拟[J]. 中国给水排水, 2015(17): 100-103. (XIONG Y, LI Z F, HU A B, et al. Simulation of Effect of LID facilities on water quantity and quality in residential area based on SWMM. China Water & Wastewater, 2015(17): 100-103. (in Chinese))
- [7] 王昆, 高成, 朱嘉祺, 等. 基于 SWMM 模型的渗渠 LID 措施补偿机理研究[J]. 水电能源科学, 2014(6): 19-21, 28. (WANG K, GAO C, ZHU J Q, et al. Compensation of mechanism of permeable channel LID measures based on SWMM[J]. Water Resources and Power, 2014(6): 19-21, 28. (in Chinese))
- [8] 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[R]. 2014. (MOHURD. Technical guides of sponge city development low impact development of rainwater system [R]. 2014. (in Chinese))
- [9] 戚海军. 低影响开发雨水管理措施的设计及效能模拟研究[D]. 北京: 北京建筑大学, 2013. (QI H J. Design and performance simulation of low impact development measures of rainwater management[D]. Beijing: Beijing University of Civil Engineering and Architecture, 2013. (in Chinese))
- [10] 陈祺模. 对海岛潜水流动特性和防止海水入侵污染问题的探讨[J]. 福州大学学报(自然科学版), 1991(3): 95-100. (CHEN Q M, Research on flowing character of phreatic water and the prevention of pollution after seawater intrusion into sea island[J]. Journal of Fuzhou University(Natural Science) 1991(3): 95-100. (in Chinese))
- [11] ROBERT A CERENKORN. Flow Phenomena in Porous media. Marcel Dekker, INC, 1983, 483-488.
- [12] 王海潮, 陈建刚, 张书函, 等. 城市雨洪模型应用现状及对比分析[J]. 水利水电技术, 2011(11): 10-13. (WANG H C, CHEN J G, ZHANG S H, et al. Application status and comparative analysis of urban storm water models[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2011(11): 10-13. (in Chinese)) DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2011.11.005.
- [13] 许迪. SWMM 模型综述[J]. 环境科学导刊, 2014(6): 23-26. (XU D. An overview of storm water management model (SWMM)[J]. Environmental Science Survey, 2014(6): 23-26. (in Chinese)) DOI: 10.13623/j.cnki.hkdk.2014.06.005.
- [14] 陈晓燕, 张娜, 吴芳芳, 等. 雨洪管理模型 SWMM 的原理、参数和应用[J]. 中国给水排水, 2013(4): 4-7. (CHEN X Y, ZHANG N, WU F F, et al. Stormwater Management Model (SWMM): principles, parameters and applications[J]. China Water & Wastewater, 2013(4): 4-7. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1000-4602.2013.04.002.
- [15] 官奕宏, 吕谋, 王灿, 等. 低影响开发技术的雨洪控制效果及水质影响分析——基于 SWMM 模型[J]. 中国农村水利水电, 2017(1): 84-87, 93. (GUAN Y H, LV M, WANG C, et al. LID stormwater control effect and water quality simulation based on SWMM[J]. China Rural Water and Hydropower, 2017(1): 84-87, 93. (in Chinese))
- [16] SCOTT SOCOLOFSKY, E. ERIC ADAMS, DARA ENTEKHA-BI. Disaggregation of Daily Rainfall for Continuous Watershed Modeling[J]. Journal of Hydrologic Engineering, 6(4).
- [17] YEBOAH GYAS AGYEI. Stochastic disaggregation of daily rainfall into one hour time scale[J]. Journal of Hydrology 309 (2005) 178 - 190 DOI: 10.1016/j.jhydrol.2004.11.018.
- [18] 班玉龙, 孔繁花, 尹海伟, 等. 土地利用格局对 SWMM 模型汇流模式选择及相应产流特征的影响[J]. 生态学报, 2016(14): 4317-4326. (BAN Y L, KONG F H, YIN H W, et al. Impacts of land use patterns on the overland flow routing options and simulation outputs of stormwater management models[J]. Acta Ecologica Sinica, 2016(14): 4317-4326. (in Chinese)) DOI: 10.5846/stxb201601050028.
- [19] 官奕宏, 吕谋, 王焯, 等. SWMM 模型中参数率定及局部灵敏度分析[J]. 供水技术, 2016(3): 21-24. (GUAN Y H, LV M, WANG Y, et al. Calibration and parts sensitivity analysis of parameters in SWMM[J]. Water Technology, 2016(3): 21-24. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1673-9353.2016.03.004.
- [20] 董欣, 杜鹏飞, 李志一, 等. SWMM 模型在城市不透水区地表径流模拟中的参数识别与验证[J]. 环境科学, 2008(6): 1495-1501. (DONG X, DU P F, LI Z Y, et al. Parameter identification and validation of SWMM in simulation of impervious urban land surface runoff[J]. Environmental Science, 2008(6): 1495-1501. (in Chinese)) DOI: 10.13227/j.hjxx.2008.06.011.
- [21] 汪涛. 基于 LID 的居住场地雨水系统径流量控制方案研究[D]. 南昌: 南昌大学, 2015. (WANG T. Research on residential runoff scheme controlled by drainage system based on low impact development[D]. NanChang: NanChang University, 2015. (in Chinese))
- [22] 刘华祥. 城市暴雨径流面源污染影响规律研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2005. (LIU H X. The impact study on urban storm non point source pollution[D]. Wuhan: Wuhan University, 2005. (in Chinese))
- [23] 刘勇华, 高超, 王登峰, 等. 城市降雨径流污染初始冲刷效应对 BMPs 选择的启示[J]. 水资源保护, 2009(6): 29-32. (LIU Y H, GAO C, WANG D F, et al. First flush effect of urban storm water runoff pollution on implications for BMPs selection[J]. Water Resources Protection, 2009(6): 29-32. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1004-6933.2009.06.008.
- [24] 张胜杰. 利用暴雨管理模型(SWMM)对低影响开发措施效果的模拟研究[J]. 中国建设信息, 2013(19): 76-78. (ZHANG S J. Simulation study on effects of low impact development measures using storm management model(SWMM)[J]. Information of China Construction, 2013(19): 76-78. (in Chinese))
- [25] SARA S C, MARCO M, IRENA S. A long term hydrological modelling of an extensive green roof by means of SWMM[J]. Ecological Engineering, 2016, 95.
- [26] 杨清海, 吕淑华, 李秀艳, 等. 城市绿地对雨水径流污染物的削减作用[J]. 华东师范大学学报(自然科学版), 2008(2): 41-47. (YANG Q H, LV S H, LI X Y, et al. Reduction functions of runoff contaminants by urban greenbelt[J]. Journal of East China Normal University (Nature Science), 2008(2): 41-47. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1000-5641.2008.02.006.