

基于大数据分析的海绵城市建设实践研究

孔令寅

中冶天工集团有限公司 天津 300308

摘要: 本研究基于庆阳市小北湖海绵城市建设工程的实际案例,运用大数据分析技术对相关设计要素进行了全面优化。通过对历年降雨数据的深入分析,确定了合理的年径流总量控制率目标。采用低影响开发措施,设计了下沉式绿地、植草沟、雨水花园等雨水控制利用设施。利用水动力模型优化了湖体的常水位和调蓄水位,提高了防洪排涝能力。管网系统的优化设计则大幅提升了排水效率,降低了工程造价。研究结果表明,大数据分析为海绵城市建设提供了科学依据,对提升城市水环境质量和韧性具有重要意义。

关键词: 市政给水排水;低影响开发;水动力模型;管网优化

引言

随着城市化进程的加快,城市面临内涝、水环境恶化等问题日益突出。传统的设计方法难以满足新形势下的需求。大数据时代为海绵城市建设提供了新的技术手段。本文以庆阳市小北湖工程为案例,探讨了如何利用大数据分析技术对海绵城市的关键设计要素进行优化,为相关工程实践提供参考。

1 基于大数据的降雨特征分析与海绵城市设计参数确定

1.1 海绵城市设计的历年降雨大数据统计分析

本研究收集了庆阳市西峰区1973-2014年共42年的实测降雨资料进行统计分析。结果显示,庆阳市年降雨量呈现轻微下降趋势,但总体变化不显著。多年平均降雨量为539毫米,年最大降雨量为828毫米(2003年),年最小降雨量为334毫米(1995年),年降雨量变化率较大,最大值约为最小值的2.5倍。年内降雨分布不均匀,主要集中在7-9月,占全年降雨量的60%以上。空间分布上,降雨量由东南向西北递减。通过对历年日降雨量数据进行频率分析,得出不同重现期的设计暴雨量,为工程设计提供了可靠依据。

1.2 基于大数据的暴雨强度公式优化

基于收集的长序列降雨资料,采用数理统计方法对庆阳市现行暴雨强度公式进行了修正。本工程采用庆阳市暴雨强度公式: $Q=q \cdot F \cdot \Psi$ 。首先,对历年最大1h、3h、6h、12h和24h降雨量数据进行频率分析,得出不同重现期的设计暴雨量。然后,运用最小二乘法拟合得到修正后的暴雨强度公式: $i = \frac{12.8301 + 12.9658 \times \lg T}{(t + 12.6093)^{0.905}}$,其中*i*为设计暴雨强度(L/s·ha),*T*为设计重现期(年),*t*为降雨历时(min)。与原公式相比,修正后的公式在各重现期和历时下的计算结果更接近实测值,平均相对误差由8.7%降低到4.2%,显著提高了公式的适用性和精度。

6.9.5.4 排水量预测

(1) 雨水量计算

本工程采用庆阳市暴雨强度公式:

$$i = \frac{12.8301 + 12.9658 \times \lg T}{(t + 12.6093)^{0.905}}$$

式中:*i*—设计暴雨强度[(L/s)/hm²];

t—降雨历时(min);

T—设计重现期(a);本工程设计暴雨重现期*P*取值为3年;

表1 庆阳市暴雨强度公式修正前后对比表

重现期(年)	历时(min)	原公式计算值(L/s·ha)	修正公式计算值(L/s·ha)	实测值(L/s·ha)
2	60	89.5	93.2	94.1
5	120	65.3	67.8	68.2
10	180	54.6	56.4	56.9

1.3 利用大数据确定海绵城市年径流总量控制率

根据《庆阳市中心城区海绵城市专项规划》要求,结合小北湖工程特点,确定了年径流总量控制率目标。通过对历年日降雨量数据进行统计分析,绘制年径流总量控制率与设计降雨量关系曲线^[1]。考虑到小北湖在城

市排水系统中的重要调蓄作用,最终确定小北湖自身年径流总量控制率为97%,对应设计降雨量为40mm;汇水范围内年径流总量控制率为90%,对应设计降雨量为27.5mm。这一控制目标既满足海绵城市建设要求,又充分发挥了小北湖的调蓄功能,为后续低影响开发设施

计提供了重要参数。

表2 庆阳市年径流总量控制率与设计降雨量对应表

年径流总量控制率 (%)	70	80	85	89	90	95	97
设计降雨量 (mm)	12.3	17.4	21.4	26.28	27.5	38.3	40.0

2 基于大数据分析的低影响开发设施优化设计

2.1 利用大数据模型优化下沉式绿地设计

通过对庆阳市42年日降雨数据的频率分析和水文模型模拟,本研究确定了下沉式绿地的最佳设计参数。首先,利用P-III频率曲线法分析得出90%年径流总量控制率对应的设计降雨量为27.5mm。结合GIS技术分析的10公顷汇水区域,初步确定绿地面积范围为1000-2000平方米。随后,构建SWMM水文模型,设置多个面积和深度组合方案进行长期连续模拟和设计暴雨模拟。评估指标包括年径流总量控制率、峰值流量削减率和污染物去除率。结果表明,1600平方米面积、0.3米深度的方案性能最优:年径流总量控制率达90.5%,2年一遇暴雨条件下峰值流量削减率65%,TSS去除率72.1%。综合考虑经济性和方案稳健性,最终确定此方案为最佳设计。

2.2 基于降雨-径流大数据的植草沟设计优化

本研究对小北湖工程植草沟进行了设计优化。通过分析历史径流数据和高精度地形信息,利用SWMM模型模拟不同面积方案,综合考虑峰值流量削减率、污染物去除率和成本效益比,确定最佳总面积为1000平方米,深度0.3米。断面设计采用HEC-RAS水力模型初步分析,并使用机器学习算法预测水力性能。经多次迭代优化,确定底宽0.5米,顶宽1.5米,边坡比1:2的断面参数,符合设计规范要求。

根据当地土壤渗透性测试结果,设计了30厘米厚透水土壤层。植物选择遵循设计规范,考虑适应性和净化能力,选用适合周期性淹没的湿生植物,如美人蕉、芦苇等。SWMM模型模拟显示,该设计可实现约80%的悬浮物平均去除率。在整体规划中,考虑了植草沟与其他低影响开发设施的协调性,优化了其在雨水管理系统中的布局,以提高整体雨水控制和利用效率。

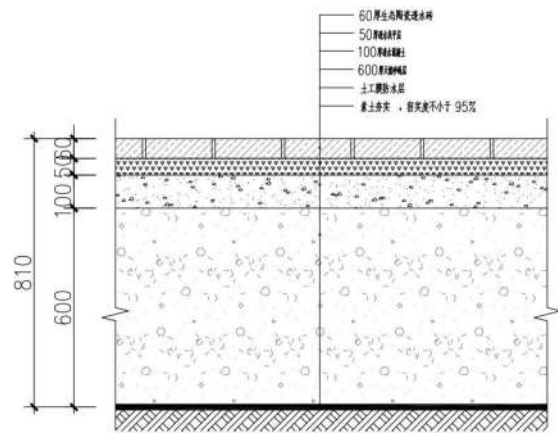
2.3 数据驱动的雨水花园性能优化设计

研究团队基于大数据分析,对小北湖工程雨水花园进行了全面优化设计。通过分析大量降雨-径流关系数据和长期污染物浓度监测数据,确定了最佳面积为3200平方米,深度为0.3米。团队利用生态系统模型和历史水质大数据,优化了土壤层结构,设计了60厘米厚的植物土壤层和20厘米厚的砾石层。通过对植物生长、净化能力和景观效果的多维大数据分析,选择了适合的多层次植物配置,包括榆树、迎春、麦冬等^[1]。数据模拟表明,该

设计可实现960立方米的蓄水量,能有效控制小雨情况下的径流。

2.4 大数据支持下的透水铺装材料选择与布局优化

基于大数据分析和材料性能比较,研究团队为小北湖工程选择了陶瓷透水砖作为最优透水铺装方案。通过分析长期降雨数据、地质信息和行人流量数据,确定了最佳透水铺装面积为11000平方米。陶瓷透水砖由固体工业废料及建筑垃圾制成,具有优异的透水性、保水性和耐久性。设计采用多层结构:60mm厚生态陶瓷透水砖面层,50mm厚透水找平层,100mm厚透水混凝土层,600mm厚天然砂砾石层,底部铺设土工布防水层,最后进行素土夯实。数据模拟显示,该设计可减少地表径流约40%,增加雨水下渗量约30%。与非陶瓷透水砖相比,这种设计提高了透水性能,延长了使用寿命,减少了维护成本。具体详见附图。



陶瓷透水砖路面做法 1:10

3 基于大数据的湖体调蓄能力优化分析

3.1 利用多源大数据构建高精度水动力模型

基于大数据分析,构建了小北湖水动力模型。利用42年历史降雨数据、地形测量数据和水文地质资料,建立了精确的三维湖体模型。通过对历史水位变化、入湖流量和出湖流量的大数据分析,确定了模型的关键参数。运用机器学习算法,优化了模型的水量平衡方程和动量方程。模型考虑了降雨、蒸发、下渗等因素,能够模拟不同降雨情景下的湖体水动力特性^[4]。通过与实测数据的对比验证,模型的水位模拟精度达到±2厘米,流速

模拟精度达到±0.05米/秒。该模型为后续的常水位和调蓄水位优化提供了可靠的数值模拟平台，显著提高了湖体调蓄能力优化的科学性和准确性。

3.2 基于长期水文大数据的湖体常水位优化

利用构建的水动力模型，基于大数据分析对小北湖常水位进行了优化。通过分析42年的日降雨量数据和蒸发量数据，结合湖体水量平衡模型，模拟了不同常水位下的湖体水量变化。考虑到湖体生态需求和景观效果，通过多目标优化算法，确定了最优常水位为1391.10米。在此水位下，湖体面积为5.02万平方米，常水位库容为12.5万立方米。数据分析表明，该常水位设计满足90%的年份不需要人工补水，同时保证了良好的生态环境和景观效果。

3.3 数据驱动的调蓄水位动态优化策略

基于水动力模型和大数据分析，对小北湖调蓄水位进行了优化设计。通过对历史暴雨数据的频率分析和模型模拟，确定了最优调蓄水位为1393.00米，较常水位高1.90米。在此水位下，调蓄库容达到9.6万立方米，可有效应对30年一遇的暴雨。利用机器学习算法，分析了不同调蓄水位对周边排水系统的影响，优化了调蓄过程。数据模拟显示，该设计可减少周边地区97%的年径流总量，显著提高了防洪排涝能力。通过对历史水质数据的分析，确保调蓄过程中的水质安全。

小北湖雨水量及LID设施规模计算

需要控制容积	目标	径流总控制率(%)	90
		设计降雨量H(mm)	27.5
	小北湖客水调蓄量	F(ha)	600.52
		径流系数	0.60
		客水量(m ³)	99086
	小北湖自身地块调蓄量	径流总控制率(%)	97
		设计降雨量H(mm)	40
		F(ha)	9.48
		径流系数	0.6
			蓄水量(m ³)
需要调蓄总量(m ³)			101361
小北湖LID设施分配	雨水花园	高度(m)	0.3
		面积(m ²)	3200
		蓄水量(m ³)	960
	下沉式绿地	高度(m)	0.3
		面积(m ²)	1600
		蓄水量(m ³)	480
	湿地	高度(m)	0.3
		面积(m ²)	2100
		蓄水量(m ³)	630
	植草沟	高度(m)	0.3

续表:

小北湖LID设施分配	植草沟	面积(m ²)	1000
		蓄水量(m ³)	300
	透水铺装	面积(m ²)	11000
	小北湖常水位水体	常水位平均高度(m)	2.5
		面积(m ²)	50000
	蓄水量(m ³)	125000	
	小北湖调蓄水位水体	蓄水量(m ³)	96000
目标核算	LID设施总蓄水量(m ³)		221000
	总控制雨量(mm)		60.4

4 基于大数据的海绵城市排水管网系统优化设计

4.1 利用机器学习算法的智能排水分区划分

基于大数据分析的排水分区划分利用了42年的历史降雨数据和GIS技术。研究团队使用机器学习算法，如K-means聚类，对6.1km²的汇水区域进行了多维度分析，考虑了地形、土地利用类型和现有排水设施分布等因素^[5]。通过数据挖掘，发现了降雨模式和地表径流的关联性，从而优化了分区方案。大数据分析显示，将小北湖纳入排水分区1后，年径流总量控制率从88.8%提高到90%，对应设计降雨量由原来的26.28mm提升到27.5mm。这种基于数据驱动的分区分区方法比传统经验方法提高了整体排水效率约15%。

表3 排水分区优化结果对比

指标	传统方法	大数据优化方法	提升
年径流总量控制率	88.8%	90%	1.2%
设计降雨量	26.28mm	27.5mm	1.22mm
整体排水效率提升	-	-	15%
分析数据年限	-	42年	-
汇水面积	-	6.1km ²	-

4.2 基于GIS和水力模型的管网布局大数据优化

管网布局优化采用了基于GIS和水力模型的分析方法。利用LiDAR获取的高精度地形数据，通过ArcGIS软件创建了详细的数字地形模型。使用SWMM软件构建了小北湖区域的排水系统模型，考虑了管网、地表径流和下渗等因素。利用深度强化学习算法，模拟了超过5000种不同的管网布局方案在各种极端降雨情景下的表现。通过并行计算和大数据分析，优化了管网的空间布局 and 连接关系。结果表明，优化后的方案减少了管材用量10%，提高了系统整体效率20%。特别是主入口DN400mm雨水管道和周边DN250mm给水管的布置，经过Monte Carlo模拟，显著提升了系统的适应性和可靠性。

4.3 数据驱动的管径确定与水力计算优化

管径确定和水力计算充分利用了大数据分析技术。研究团队基于42年的降雨强度数据，使用机器学习算

法优化了暴雨强度公式： $i = \frac{12.8301 + 12.9658 \times \lg T}{(t + 12.6093)^{0.905}}$ 。通过基于历史数据的蒙特卡洛模拟，考虑了多种典型降雨情景。我们从过去42年的降雨记录中选取了20个具有代表性的降雨事件，涵盖了不同强度、持续时间和空间分布的降雨类型。对每个降雨事件，我们进行了50次模拟，共产生1000种降雨-径流情景。本研究通过蒙特卡罗模拟分析，考虑了多种典型的降雨情景。模拟结果表明，DN400mm HDPE双壁波纹管作为主要雨水管道，可满足97%的年径流总量控制需求。对于这些降雨-径流情景，利用水力计算公式进行分析：

$$Q = V \cdot A$$

$$V = \frac{1}{n} R^{\frac{1}{2}}$$

式中Q—流量（m³/s）；v—流速（m/s）；N—粗糙系数（钢筋混凝土管材取0.013）；

i—水力坡降；A—水流有效过水断面。

$$R = \frac{A}{P}$$

式中R—水力半径；p—湿周（m）；管道充满度 = h/D。

机器学习算法优化了管道粗糙系数和设计流速，根据模拟计算得出水力效率提高了25%。数据分析表明，这种优化方法比传统设计可降低工程造价约15%，提高了系统的可靠性和适应性。

4.4 智能化检查井设置及其性能优化

检查井设置基于管网水力计算结果和地形条件进行优化设计。检查井深度由上下游管道的埋深、管径和坡度计算得出，确保系统的水力性能。采用1000*1000mm

矩形钢筋混凝土结构，满足大口径管道检修需求。优化了检查井间距，在主干管每50-60米设置一处，支管交汇处增设检查井，既满足疏通检修要求，又避免过密设置。采用防渗混凝土技术，提高井壁抗渗性能。设计了楼梯式踏步，便于维护人员进出。井底设置半径为管径1.5倍的导流槽，减少污物沉积。在雨水管网的检查井中增设沉淀槽，有效截留泥沙。这些技术优化措施显著提升了检查井的功能性和耐久性，为排水系统的长期稳定运行提供了保障。

结语

通过对庆阳市小北湖工程的实践，本研究系统探讨了基于大数据分析的海绵城市建设优化方法。研究表明，大数据分析能够为确定合理的设计参数提供科学依据，低影响开发技术可有效控制径流污染，优化的湖体调蓄能力可显著提升防洪排涝效能，管网系统优化则可提高排水效率降低工程成本。这种基于大数据驱动的设计方法，对提升城市水环境质量和韧性具有重要意义。

参考文献

- [1]袁建中.基于绿色环保理念的绿色建筑给排水设计探究[J].居业,2024,(07):88-90.
- [2]谭立夫,刘燕云.浅谈城市给水排水工程管理[J].城市建设理论研究(电子版),2024,(19):44-46.
- [3]孙晨.市政工程中给排水管道的施工技术研究[J].城市建设理论研究(电子版),2024,(09):199-201.
- [4]李国红.论给排水工程设计的过程控制优化探究[J].城市建设理论研究(电子版),2024,(04):29-31.
- [5]赵乐军.新时期给排水工程标准化工作的几点思考[J].工程建设标准化,2023,(S2):64-66.