【专题：海绵城市 / Sponge City】

·特邀专题策划：刘建，任欣欣·

基于 Kriging 插值的校园内涝模拟与模型优选

杨亚红¹, 杨兴峰¹, 闫俊江¹, 蔚阳²

1) 兰州理工大学土木工程学院, 甘肃兰州 730050; 2) 清华大学深圳研究生院, 广东深圳 518055

摘要: 为探索中国兰州市某高校校园雨水管网节点积水深度的主要影响因素, 以研究区域雨水管网 246 个节点在降雨重现期 (P) 为 7 a 和 50 a 时积水深度的数据为例, 利用 ArcGIS 统计模块分析 2 个重现期降雨下的节点积水深度数据的空间差异性, 采用交叉验证法对比研究 4 种 Kriging 插值模型 (稳定、球形、高斯与指数模型)。由 Pearson 相关性分析结果可知, 2 种重现期的积水情形下节点最大深度与积水深度相关性均较强, 相关系数分别为 0.605 和 0.766。4 种 Kriging 半变异函数模型的预测值与实测值的对比结果表明, 高斯模型的偏差均值 (Kriged reduced mean error, KRME) 最小 ($P = 7$ a 时, $KRME = -0.87 \times 10^{-4}$; $P = 50$ a 时, $KRME = 0.87 \times 10^{-3}$), 一致性系数 (Kriged reduced mean square error, KRMSE) 最优 ($P = 7$ a 时, $KRMSE = 0.939$; $P = 50$ a 时, $KRMSE = 0.947$), 确定该研究区域节点积水深度 Kriging 插值方法最适宜的模型为高斯模型。研究结果可为利用研究区域有限的内涝数据更有效地识别积水内涝提供方法, 同时为内涝的控制和消减措施提供理论基础。

关键词: 海绵城市; Kriging 插值; 半变异模型; 交叉验证; 拟合模型; 径流; 低影响开发; 内涝
中图分类号: X328 **文献标志码:** A **doi:** 10.3724/SP.J.1249.2021.01027

Campus waterlogging simulation and model preference based on Kriging interpolation

YANG Yahong¹, YANG Xingfeng¹, YAN Junjiang¹, and YU Yang²

1) College of Civil Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, Gansu Province, P. R. China
2) Shenzhen Graduate School of Tsinghua University, Shenzhen 518055, Guangdong Province, P. R. China

Abstract: In order to explore the main influence factors of the node water depth of rainwater pipe network located in a campus in Lanzhou city and to study the interpolation method suitable for the node water depth data, we analyze the data of the water depth of 246 nodes of the rainwater pipe network in the study area under the rainfall return periods of 7 years and 50 years (i. e., $P = 7$ a and $P = 50$ a, respectively). Using ArcGIS software, we make spatial difference analysis of node water depth data of rainfalls in the two return periods, and conduct a comparative study on the four Kriging interpolation models, i. e. stable model, spherical model, Gaussian model and index model, by means of cross-validation method. The results show that the Pearson correlations between the maximum depth of nodes and the depth of water accumulation for $P = 7$ a and $P = 50$ a are strong, and the correlation coefficients are 0.605 and 0.766, respectively. Through comparing the predicted values with the measured values of four Kriging semi-variation function models, it is found that the Kriged reduced mean error by Gaussian model is minimum ($KRME = -0.87 \times 10^{-4}$ at $P = 7$ a and $KRME = 0.87 \times 10^{-3}$ at $P = 50$ a), and the Kriged reduced mean square error is the best ($KRMSE = 0.939$ at $P = 7$ a and $KRMSE = 0.947$ at $P = 50$ a). The Gaussian model is

Received: 2020-05-29; **Accepted:** 2020-09-18

Foundation: Science and Technology Program of Gansu Province (1506RJZA099)

Corresponding author: Associate professor YANG Yahong. E-mail: yangyahong@lut.cn

Citation: YANG Yahong, YANG Xingfeng, YAN Junjiang, et al. Campus waterlogging simulation and model preference based on Kriging interpolation [J]. Journal of Shenzhen University Science and Engineering, 2021, 38(1): 27-35. (in Chinese)

determined as the most suitable model for Kriging interpolation method of node water depth in the study area, which provides a more effective method to identify water logging in the study area by using limited waterlogging data, and provides a theoretical basis for the control and reduction measures of waterlogging.

Key words: sponge city; Kriging interpolation; semi-variation model; cross-validation; fitting model; radial flow; low impact development (LTD); waterlogging

随着全球气候变化加剧,突发性强降雨引发的城市内涝问题日趋严重,给人们的生命财产和社会经济发展构成巨大威胁^[1].据统计,2008—2018 年期间,中国平均每年因洪涝灾害死亡人口约为 760 人,直接经济损失为 2 119.50 亿元^[2].对暴雨引发的城市内涝进行风险评估,可针对性地进行预防和治理,是降低城市内涝灾害损失的一条有效途径.

国内外对于洪涝灾害风险评估的研究较多. BENITO 等^[3]综合古代洪水信息(100 ~ 10 000 a)、历史洪水数据(1 000 a)以及水文站数据(30 ~ 50 a),提出了基于历史洪灾数据的洪水风险评估方法,并将其应用于欧洲国家. WASHAKH 等^[4]综合分析 1990—2018 年 Arun 流域 49 个冰湖的冰湖溃堤洪水(glacial lake outburst flood, GOLF)的气温、降水趋势与所记录 GOLF 事件发生的相关性,提出了一种简单易行的 GOLF 风险评估模型.20 世纪初,随着地理信息系统(geographical information system, GIS)的不断发展,基于情景模拟的综合性风险评估与分析开始受到普遍关注.应用该方法时,给定灾害初始条件,根据灾害演化机理进行模拟推演,得到灾害的发展演化过程,从而估计灾害损失.该分析方法能反映出灾害的动态演化,并对以前从未发生过的非常规灾害进行后果评价,其评估对象涉及多个方面,可预测建筑物、经济与社会等各方面的损失情况. AMEER 等^[5]利用情景模拟演化的方法对水土评估模型(soil and water assessment tool, SWAT)的模拟精度进行改进.此外,国内学者也尝试开展了一些基于情景模拟的洪涝灾害风险评估.尹占娥等^[6]基于情景模拟的方法针对上海市静安区小尺度暴雨内涝进行了风险评估.胡蓓蓓等^[7]根据未来规划,对天津市滨海新区 2020 年的暴雨内涝风险进行了预测评估.

为使评估结果更接近实际,评估的时空精细化程度能够达到事半功倍的效果.如何提高评估的时空精细化,成为目前风险内涝灾害评估的发展趋势.目前,该模拟评估方法主要针对沿海城市小尺度流域研究较多,而针对内陆地区研究较少且不够深入.本研究建立一种基于暴雨洪水管理模型-地理信

息系统(storm water management model with geographic information system, SWMM-GIS)的水文学模型的城市内涝情景模拟风险评估方法,以中国西北地区某校园节点积水数据为例进行内涝风险评估,模拟该地区在特定重现期降雨情景下的城市内涝分布,并对可能造成的灾害损失情况进行分析.旨在筛选出适合于该区域的内涝插值模型方法,为利用有限观测点更有效地识别出内涝区域分布提供基础.

1 材料和方法

1.1 基于 Kriging 法的情景模拟方法

1.1.1 基于 Kriging 插值的城市内涝情景模拟

降雨径流模型考虑降雨的物理过程,通过水力学公式可计算降雨引发内涝的时空分布,而且模型对城市降雨积水的具体特征做了大幅简化,在保证一定的计算精度的前提下大幅降低了计算时间.目前,世界范围内有许多可用的城市降雨径流模型,例如,SWMM 和伊利诺城市排水区域模拟(Illinois urban drainage area simulator, ILLU-DAS)等^[8].这类模型基本可以满足城市暴雨排水系统模拟的需要.但由于是一维水动力模型,所以不适合做内涝评估分析.

Kriging 插值法的提出为内涝时空分布评估提供了可能.该方法通过对积水点采样数据及地理特征合理分析其可能出现的演化过程,进而选择合适的拟合模型创建淹没分析图. Kriging 插值方法不仅能量化已知点之间的空间自相关性,并可说明采样数据在预测区域范围内的空间分布情况^[9].

与反距离权重法类似, Kriging 插值法对周围的测量值进行加权以得出未测量位置的预测.其计算公式^[10]为

$$\hat{Z}(s_0) = \sum_{i=1}^N \lambda_i Z(s_i) \quad (1)$$

其中, s_i 为第 i 个积水点位置; $Z(s_i)$ 为第 i 个位置的测量值; λ_i 为第 i 个位置处的测量值的未知权重; s_0 为预测位置; N 为测量值数.

1.1.2 半变异函数模型优选及方法检验

1) 半变异函数及拟合模型: Kriging 法插值过

程中,有限积水点扩散区域化模型是随机且规律性的.因此,模型建立需要由合适的半变异函数实现从有限至区域化的相似扩散演化,使半变异函数曲线与积水点数据达到拟合,最终用于模型预测.

半变异函数计算公式^[11]为

$$\gamma(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [Z(s_i) - Z(s_i + h)]^2 \quad (2)$$

其中, h 为距积水点 s_i 的距离; $\gamma(h)$ 为 h 处的积水深度变异函数; $N(h)$ 为分割距离为 h 时样本点的总个数; $Z(s_i)$ 、 $Z(s_i + h)$ 分别为积水点 s_i 和 $s_i + h$ 处的积水深度测量值.

2) 半变异函数的模型优选: Kriging 法中,式(2)只能反映出积水点深度本身的变异特征和空间分布,不能反映出在不同空间滞后距离上的空间变异特征以及积水点的空间异质性定量化特征,故需要通过常用半变异函数的拟合模型对已知数据点离散关系进行拟合^[11].拟合模型由半变异函数根据已知测量点的空间自相关性确定,如图1^[12].目前常用的半变异模型有稳定、球面、指数和高斯模型等.选择合适的拟合模型是空间插值的前提条件,直接影响空间插值的精度结果.

图1 半变异函数拟合曲线示例^[12]

Fig. 1 Examples of semi-variation fitting curves^[12]

图1中的 C_0 是块金值,为半变异函数曲线在 $\gamma(h)$ 轴上的截距,表示积水深度受到随机因素影响的空间变异; C 为偏基台值,即半变异函数值达到稳定时的增量,用于反映积水深度因空间结构引起的变异; $C_0 + C$ 为基台值,表示积水深度总的空间变异; $C_0 / (C_0 + C)$ 为基底效应,表示空间的变异特征,该值越大,说明积水深度的空间变异更多是由随机成分引起的; a 为变程,即半变异函数第1次达到稳定时所对应的采样距离,表示积水深度的空间自相关范围.

最优模型主要通过无偏性和一致性来判断.前者常采用偏差均值(Kriged reduced mean error,

KRME)指标来衡量;后者则采用一致性系数(Kriged reduced mean square error, KRMSE)指标判定. KRME 越接近0,表示无偏估计的效果越佳. KRMSE 越接近1,表示模型越好^[9,12]. KRME 与 KRMSE 计算公式分别为

$$\text{KRME} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\hat{Z}_i - Z_i) \quad (3)$$

$$\text{KRMSE} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(\frac{\hat{Z}_i - Z_i}{\delta} \right)^2 \quad (4)$$

其中, $\hat{Z}_i$ 为第 i 个测量点的实际值; Z_i 为第 i 个测量点的估计值; n 为测量点数目; δ 为实际值的标准偏差.

3) 检验方法:为保证插值精度,在模型优选的基础上进一步采用交叉检验(cross-validation)进行插值方法验证.原理是在给定的样本模型中汇总之后留出部分样本用于建立模型进行预测,并求出这小部分样本的预测误差^[9].

1.2 研究区域概况

研究区域地处兰州市靠近黄河南岸的七里河区,如图2.该城区位于市内中南部,地理坐标为 $103^\circ 36' \text{E}$ — $103^\circ 54' 54'' \text{E}$, $35^\circ 50' 32'' \text{N}$ — $36^\circ 06' 12'' \text{N}$.地势南高北低,平均海拔2 321 m.南部为石质山地,地形特征为山高、谷深、坡陡,岩石裸露.七里河区境内属大陆性半干旱气候.主要特征是:四季分明,冬夏长,春秋短.雨热同季,垂直气候变异显著.气温、热量和光照随海拔由南向北升高;年平均降雨量为327 mm,由南到北逐渐降低.校区占地87 hm²,在开发之前多为平顶屋面,其数量少且占地面积有限;周围多分布山杨、桦树群体及少量灌木.这类植物渗透系数高,对水分蒸散与入渗作用显著.校园开发后土地利用类型多样化,其中,绿地面积占比为42%,不渗透面积占比为57% (包括新开发地块4%、建筑物10%、开阔空地14%和道路29%).

利用校园雨水管网计算机辅助设计(computer aided design, CAD)图将研究范围划分为子汇水区226个.经统计,研究区域概化管道总长为8 804.55 m,汇水区总面积64.11 hm²,概化结果如图3.

1.3 暴雨强度公式的确定及设计降雨过程线

因缺乏兰州市历年降雨气象水文资料,所以本研究降雨数据由暴雨强度公式生成,该公式由王杰等^[13]根据兰州市国家基本气象站1960—2014年的降雨资料,通过皮尔逊-III型分布拟合得出.降雨

图 2 研究区域范围 (线内)
Fig. 2 The study area (in line)

强度公式为

$$i = \frac{924 \times (1 + 3.918) \lg P}{167 \times (t + 14.92)^{0.942}} \quad (5)$$

其中, i 为降雨强度 (单位: mm/min); P 为降雨重现期 (单位: 年); t 为降雨历时 (单位: min). 在该模型中, 采用芝加哥降雨模式描述降雨过程. 这种降雨模式可以概括大多数降雨类型, 能反映出地表径流与出流量峰值, 因此适用于区域和雨水系统设计的预评价^[14]. 研究中采用雨峰系数为 0.291, 其主要目的是分析早期降雨高峰对研究区域径流和积水的影响. 选取 1、2、5 和 7 a 重现期 (降雨历时短, 为 2 h) 和 10、20、30 和 50 a 重现期 (降雨历时长, 为 12 h) 绘制芝加哥降雨过程线如图 4. 本研究中实测降雨数据采用 2018 年 6 月、7 月及 2019 年 6 月、7 月共 4 个月的降雨特征和对应的流量数据, 降雨编号依次为 201806、201807、201905 和 201907 (表 1).

表 1 实测降雨数据

Table 1 Measured rainfall data

降雨 编号	降雨天 数/d	降雨 量/mm	降雨峰 值/mm	洪峰流量 误差/%	洪水总量 误差/%	N-S 效率 系数
201806	6	11.4	3.6	6.3	3.1	0.87
201807	8	13.4	15.6	5.3	4.3	0.84
201905	11	56.7	19.5	4.5	4.3	0.88
201907	11	51.1	19.8	4.6	5.2	0.85

(a) 子汇水区划分

(b) 雨水管网概化分布

图 3 研究区域概化结果

Fig. 3 The regional generalization results of study area

2 结果与分析

基于以上数据, 将降雨数据导入率定后的

图4 不同重现期下芝加哥降雨过程线

Fig. 4 The precipitation pattern of Chicago in different recurrence periods

SWMM 模型中, 模拟得到每个重现期下的雨水井节点积水数据. 分别取短历时和长历时下重现期最大 ($P = 7$ a 与 $P = 50$ a) 时的积水情形进行基于 Kriging 插值的内涝情景模拟, 分析其可能出现的积水分布情况.

2.1 节点积水影响因素 Pearson 相关性分析

雨水管网中, 管网节点(雨水井)的内涝积水情况与雨水井的分布、内底高程及最大深度和井内污染物的空间浓度分布等因素密切相关. 不合理雨水井及管道的空间布置不当均会损坏管网, 造成局部区域的内涝积水与污染^[15-16]. 选取与影响积水深度相关的节点内底高程与节点最大深度等节点结构属性变量, 利用 SPSS 19.0 软件进行 Pearson 相关性分析, 得到研究区域 $P = 7$ a 与 $P = 50$ a 节点积水的主要影响因素相关性大小(表2). 其中, E 为节点内底标高; H 为节点最大深度; Q_1 为 $P = 7$ a 时节点积水深度; Q_2 为 $P = 50$ a 时节点积水深度. 结果

表明, 与内底标高对积水深度的影响程度相比, 节点最大深度对积水深度影响更大. 重现期为 7 a 和 50 a 的积水深度标准差分别为 1.034 和 1.043, 它们分别与节点最大深度的标准差均非常接近; Pearson 相关性系数分别为 0.605 与 0.766, 均大于 0.5. 分析其原因: 重现期为 7 a (短历时) 和 50 a (长历时) 下降雨量分别达到 28.33 mm 和 61.03 mm, 按照气象学上对降雨的划分属于大到暴雨^[17-18]. 当降雨强度最大时, 到达地面形成地表径流可能在校区南高北低的地势作用驱使下直接汇入雨水管网并到达节点的最大深度, 加上后续径流的持续补充, 导致节点可以在短时间内保持着与最大深度相差无几的积水深度, 情况严重时可能出现溢流现象.

表2 节点积水深度与各影响因子的

Pearson 相关性系数

Table 2 Pearson correlation coefficients of node water depth and influence factors

影响因子	均值/m	标准差	Pearson 相关性系数
E	1 592.16	3.518	-0.327
H	2.30	1.120	-0.281
Q_1	1.40	1.034	0.605
Q_2	1.65	1.043	0.766

2.2 基于 Kriging 插值的节点积水深度情景模拟

通过节点积水影响因素 Pearson 相关性分析, 选用节点最大深度作为节点积水深度的主要影响因素, 基于校园数字高程模型(digital elevation model, DEM)进行 Kriging 插值情景模拟.

2.2.1 数据统计与空间差异分析

通过对原始节点积水深度数据进行统计分析, 并绘制出正态分布图, 见图5. 由图5可知, $P = 7$ a 与 $P = 50$ a 时的节点积水深度数据均存在明显的线性关系且基本符合正态分布. $P = 7$ a 重现期下 211 个积水节点深度变化为 0 ~ 5.40 m, 平均深度为 1.39 m; $P = 50$ a 重现期下 220 个积水节点深度变化范围为 0 ~ 5.38 m, 平均深度为 1.50 m. 此外, 同一降雨情境下易发生积水的节点多集中在深度较浅的范围内: $P = 7$ a 时, 积水深度为 0.76 ~ 1.52 m 内有 87 个积水节点, 占比 39.4%; $P = 50$ a 积水深度在 0.81 ~ 1.62 m 内有 127 个积水节点, 占比 57.7%. 结果表明雨水管网节点深度设置不恰当, 容易造成局部区域大面积积水.

图 5 积水点数据概括性统计分析

Fig. 5 Summary statistical analysis of water accumulation point data

2.2.2 半变异函数模型的对比分析与选择

通常在 Kriging 插值模型方法的选择中, 半变异函数作为统计采样点间的距离函数, 其步长直接反映插值精度^[14,19]. 基于以上统计分析, 利用 ArcGIS10.4 中空间分析工具确定点与相邻元素之间

的平均距离, 保证参与计算的半方差的的点对数不少于 30. 针对 $P = 7$ a 与 $P = 50$ a 降雨情境下的节点积水深度数据, 分别构建稳定、球面、指数与高斯 4 种半变异函数模型, 并计算各自的特征参数进行模型优选对比. 其模型参数如表 3 所示.

表 3 四种待选模型参数对比

Table 3 Comparison of parameters of four models to be selected

P/a	理论模型	C_0	$C_0 + C$	a	$C_0/(C_0 + C)$	$10^3 \times \text{KRME}$	KRMSE
7	稳定	0.471 38	1.180 18	233.93	0.399 414	-1.520	0.933
	球形	0.401 70	1.172 18	263.95	0.342 695	-2.420	0.929
	指数	0.306 57	1.247 17	344.61	0.245 813	-7.030	0.923
	高斯	0.498 78	1.169 91	216.93	0.426 340	-0.087	0.939
50	稳定	0.404 18	1.221 03	402.07	0.331 016	-9.100	0.941
	球形	0.556 17	1.180 81	317.63	0.471 007	-3.720	0.938
	指数	0.437 16	1.213 45	377.25	0.360 262	-7.960	0.942
	高斯	0.632 23	1.179 87	259.05	0.535 847	0.870	0.947

通过模型拟合对比分析, 在两种降雨情境下得到的积水深度数据中, 模型曲线与实际值平均化拟合度较好的均为高斯模型. 在表 3 的模型参数分析中, 高斯模型的 KRME 值较其他模型最接近 0, 其 KRMSE 值最接近于 1.

综上所述, 4 个待选拟合曲线待选模型中, 高斯模型最适合 $P = 7$ a 和 $P = 50$ a 降雨情境下的节点积水深度数据做插值研究, 故优选高斯模型.

2.2.3 交叉验证结果分析

为检验高斯模型用于研究区域节点积水深度 Kriging 插值模拟的预测精度, 在 ArcGIS10.4 的地统计模块中将研究区域 $P = 7$ a 与 $P = 50$ a 的 246 个节点积水深度数据随机构建为 2 个子集要素:

65% ($N = 160$) 的数据作为训练数据集, 35% ($N = 86$) 的数据作为测试数据集. 以进行节点的预测值与实测值的交叉验证分析, 得出研究区域节点积水深度的空间插值结果的预测值与实测值散点分布(图 6). 据图 6, 两个重现期降雨下的节点积水深度测量值与预测值拟合效果均较好, 相关系数 R^2 分别为 0.784 和 0.857. 拟合曲线(蓝色线)与 1:1 标准直线相差不大. 通过将原始数据观测值和交叉验证所得到的预测值进行分析比较, 发现在考虑节点最大深度为主要因素时, 通过 Kriging 高斯模型插值, $P = 7$ a 预测节点积水深度均值为 1.395 m, 实测节点积水深度均值 1.396 m; $P = 50$ a 预测节点积水深度均值为 1.655 m, 实测节点积

水深度均值 1.654 m. 研究结果表明, 在考虑节点最大深度因素的 Kriging 插值模拟高斯模型预测可

取得较好的拟合效果.

图 6 交叉验证结果

Fig. 6 The result of cross-validation

2.2.4 节点积水深度空间分布预测分析

选用高斯 Kriging 插值模型对研究区域 $P = 7 \text{ a}$ 和 $P = 50 \text{ a}$ 节点积水深度数据进行空间插值模拟 (图 7). 从图 7 可以看出, 两个重现期下节点积水深度变化范围基本一致, 分别为 $0.627 \sim 7.577 \text{ m}$ 与 $0.639 \sim 8.100 \text{ m}$. 在空间上呈现东北与西南向积水分布较良好, 东南与西北向积水分布较严重, 这可能是高强度降雨下, 东北与西南方向的管网布置较稀疏且均是管径较小的管段, 而东南与西北方

向的管网布置较密集且均是管径较大的干管及排放口排放高重现期形成的即时径流量累积导致的. 此外, 图 8 中西北方向积水深度红色区域逐渐扩大, 且绿色区域逐渐被黄色区域占据, 开始向红色区域过渡, 呈现出绿色区域先快后慢的减少, 而红色区域先快后慢的扩大趋势. 这很可能是因为高重现期早期较大强度降雨使管径偏小的管段达到满载负荷状态, 使得研究区域地势较低容易积水的地方出现内涝.

图 7 节点积水深度 Kriging 高斯模型插值结果

Fig. 7 Interpolation results of Kriging Gaussian model for node water depth

3 结 论

1) 通过对兰州市某校区雨水管网 $P = 7$ a 和 $P = 50$ a 节点积水深度数据进行 Pearson 相关性分析, 结果表明: 与节点内底标高对节点积水深度的影响程度相比, 节点最大深度对节点的积水深度影响更大. 其 Pearson 相关系数分别为 0.605 ($P = 7$ a) 和 0.766 ($P = 50$ a), 从而确定节点最大深度作为积水深度插值模拟的主要影响因子.

2) 针对原始积水点数据构建稳定、球形、高斯和指数模型进行半变异函数模型的优选及空间差异统计分析, 发现在两种降雨情境下得到的积水深度数据中, 模型曲线与实际值平均化拟合度较好的均为高斯模型. 在模型参数分析中, 高斯模型的偏差均值较其他模型最接近 0 ($P = 7$ a 时 $KRME = -0.87 \times 10^{-4}$; $P = 50$ a 时 $KRME = 0.87 \times 10^{-3}$), 其一致性系数最接近 1 ($P = 7$ a 时, $KRMSE = 0.939$; $P = 50$ a 时, $KRMSE = 0.947$).

3) 通过 Kriging 高斯模型插值, 两个重现期下节点积水深度变化基本处于 0.627 ~ 8.100 m 内, 且呈现东北与西南向积水分布较良好, 东南与西北向积水分布较严重. 同时积水深度红色区域逐渐扩大, 绿色区域逐渐被黄色占据, 开始向红色区域过渡.

4) 在雨水管网中, 节点 (雨水井) 积水内涝除了与节点内底高程和最大深度等节点本身的结构属性变量有关外, 可能还与大气湿度、气温、环境等因素密切相关. 因此, 为使得插值结果更加精确化, 可考虑适当引入上述环境因子进行空间插值.

5) 通过对常规开发情景下的研究区域进行节点积水模拟, 得到不同降雨重现期下节点积水情况, 结果表明局部区域存在内涝风险. 对于这种局部内涝问题, 国内传统的思想是“以排为主”, 即采取加大管道管径, 提高排放能力的措施来解决. 但随着新型雨洪管理理念的引入, 低影响开发理念越来越多地应用在城市建设中. 本研究为 LID 措施的开展提供一定的理论基础, 可以通过对比不同的 LID 措施对于研究区域雨洪控制的影响, 筛选出最佳的 LID 措施组合来降低局部内涝的风险.

基金项目: 甘肃省科技计划资助项目 (1506RJZA099)

作者简介: 杨亚红 (1976—), 兰州理工大学副教授、博士. 研究方向: 水质净化机理. E-mail: yangyahong@lut.cn

引 文: 杨亚红, 杨兴峰, 闫俊江, 等. 基于 Kriging 插值的校园内涝模拟与模型优选[J]. 深圳大学学报理工版, 2021, 38(1): 27-35.

参考文献 / References:

- [1] CAI Wenjun, ZHU Xueping, PENG Anbang, et al. Flood risk analysis for cascade dam systems: a case study in the Dadu River Basin in China [J]. Water, 2019, 11(7): 21-32.
- [2] 任建超, 谢水波, 刘 慧, 等. 海绵城市背景下的城市内涝防控策略研究[J]. 水利规划与设计, 2020(11): 35-38, 105.
REN Jianchao, XIE Shuibao, LIU Hui, et al. Research on urban waterlogging prevention and control strategy under the background of sponge city [J]. Water Resources Planning and Design, 2020(11): 35-38, 105. (in Chinese)
- [3] BENITO G, LANG M, BARRIENDOS M, et al. Use of systematic, palaeoflood and historical data for the improvement of flood risk estimation: review of scientific methods [J]. Natural Hazards, 2004, 31(3): 623-643.
- [4] WASHAKH R M A, CHEN Ningsheng, WANG Tao, et al. GLOF risk assessment model in the himalayas: a case study of a hydropower project in the upper Arun River [J]. Water, 2019, 11(9): 1-23.
- [5] MUHAMMAD A, EVENSON G R, STADNYK T A, et al. Impact of model structure on the accuracy of hydrological modeling of a Canadian Prairie watershed [J]. Journal of Hydrology: Regional Studies, 2019, 21: 40-56.
- [6] 尹占娥, 许世远, 殷 杰, 等. 基于小尺度的城市暴雨内涝灾害情景模拟与风险评估[J]. 地理学报, 2010, 65(5): 553-562.
YIN Zhan'e, XU Shiyuan, YIN Jie, et al. Simulation and risk assessment of urban rainstorm and waterlogging disaster based on small scale [J]. Acta Geographica Sinica, 2010, 65(5): 553-562. (in Chinese)
- [7] 胡蓓蓓, 周 俊, 王 军, 等. 基于情景模拟的天津市滨海新区 2020 年暴雨内涝风险评估[J]. 地理科学, 2012, 32(7): 846-852.
HU Peipei, ZHOU Jun, WANG Jun, et al. Risk assessment of rainstorm waterlogging in binhai new area of tianjin in 2020 based on scenario simulation [J]. Acta Geographica Sinica, 2012, 32(7): 846-852. (in Chinese)

- [8] 刘春春, 刘万青, 张悦, 等. 基于 SWMM 模型的西安市清河流域暴雨洪峰流量模拟[J]. 干旱区研究, 2018, 35(1): 35-42.
LIU Chunchun, LIU Wanqing, ZHANG Yue, et al. Simulation of rainstorm peak discharge in qinghe river basin of Xi'an city based on SWMM model [J]. Arid Zone Research, 2018, 35(1): 35-42. (in Chinese)
- [9] 闫星光, 吴琳娜, 周涌, 等. 喀斯特地区月均降水协克里金插值方法研究——以贵州省为例[J]. 云南大学学报自然科学版, 2017, 39(3): 432-439.
YAN Xingguang, WU Linna, ZHOU Yong, et al. Study on co-Kriging interpolation method for monthly mean precipitation in karst region: a case study of Guizhou province [J]. Journal of Yunnan University Natural Sciences Edition, 2017, 39(3): 432-439. (in Chinese)
- [10] 刘永坤, 陈放, 汤春节, 等. 顾及各向异性的三维克里金空间插值[J]. 科技通报, 2019(4): 7-15.
LIU Yongkun, CHEN Fang, TANG Chunjie, et al. Three-dimensional Kriging interpolation with anisotropy in mind [J]. Bulletin of Science and Technology, 2019(4): 7-15. (in Chinese)
- [11] 陈昭, 罗小波, 高阳华, 等. 基于半变异函数的重庆市地表温度空间异质性建模及多尺度特征分析[J]. 地球信息科学学报, 2019, 21(7): 1051-1060.
CHEN Zhao, LUO Xiaobo, GAO Yanghua, et al. Modeling and multi-scale analysis of the spatial heterogeneity of land surface temperature in Chongqing based on Semi-Variogram [J]. Journal of Geo-Information Science, 2019, 21(7): 1051-1060. (in Chinese)
- [12] QIN Qianqian, WANG Haiyan, LEI Xiangdong, et al. Spatial variability in the amount of forest litter at the local scale in northeastern China: Kriging and cokriging approaches to interpolation [J]. Ecology and Evolution, 2020, 10(2): 778-790.
- [13] 王杰, 杨银, 吴红, 等. 兰州市暴雨强度公式拟合方法研究[J]. 高原山地气象研究, 2016, 36(4): 23-27.
WANG Jie, YANG Yin, WU Hong, et al. Study on fitting method for rainstorm intensity formula in Lanzhou [J]. Plateau and Mountain Meteorology Research, 2016, 36(4): 23-27. (in Chinese)
- [14] LI Jiake, DENG Chenning, LI Huaian, et al. Hydrological environmental responses of LID and approach for rainfall pattern selection in precipitation data-lacked region [J]. Water Resources Management, 2018, 32(10): 3271-3284.
- [15] ZAKHAROVA E A, KOURAEV A V, STEPHANE G, et al. Recent dynamics of hydro-ecosystems in thermokarst depressions in Central Siberia from satellite and in situ observations: importance for agriculture and human life [J]. Science of the Total Environment, 2018, 615: 1290-1304.
- [16] GAAFFAR M, MAHMOUD S H, GAN T Y, et al. A practical GIS-based hazard assessment framework for water quality in stormwater systems [J]. Journal of Cleaner Production, 2020, 245: 1-38.
- [17] 刘海文, 丁一汇. 华北汛期日降水特性的变化分析[J]. 大气科学, 2010, 34(1): 12-22.
LIU Haiwen, DING Yihui. Analysis of daily precipitation characteristics over North China during rainy seasons [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2010, 34(1): 12-22. (in Chinese)
- [18] 彭竹葳. 基于 SWMM 的滇池环湖截污干渠(东岸段)的截流能力及运行状况分析[D]. 重庆: 重庆大学, 2014.
PENG Zhuwei. Study on intercepting capability and operational state of interception Trunk (Eastern Section) of the Dianchi Lake based on SWMM [D]. Chongqing: Chongqing University, 2014. (in Chinese)
- [19] 季青, 余明. 基于协同克里格插值法的年均温空间插值的参数选择研究[J]. 首都师范大学学报自然科学版, 2010, 31(4): 81-87.
JI Qing, YU Ming. Study on parameters setting of ordinary cokriging interpretation to average annual temperature [J], 2010, 31(4): 81-87. (in Chinese)

【中文责编: 晨兮; 英文责编: 之聿】