DOI:10.11918/j.issn.0367-6234.201807050

构建内涝势冲量的海绵城市内涝程度评价方法

沈才华[1,2], 王浩越[1], 褚明生[1,3]

(1.岩土力学与堤坝工程教育部重点实验室(河海大学),南京 210098;
2.江苏省岩土工程技术工程研究中心(河海大学),南京 210098; 3.浙江省宁波市规划局奉化分局, 浙江 宁波 315500)

摘 要: 近年来我国城市内涝频发,雨季"看海"情况屡见不鲜,而目前对于内涝程度还没有统一的评价指标体系,为了得到更加完善的海绵城市内涝程度评价指标体系,基于城市内涝动态历时特征,提出内涝势冲量的概念,建立城市局部内涝瞬时指标、局部内涝综合指标、区域整体内涝指标标准值等组成的评价城市内涝程度的指标体系及其具体计算分析方法. 针对宁波市奉化区中交未来城工程案例,结合 SWMM 模型计算该区域内涝情况,并采用此评价方法进行分析. 结果表明:计算的局部内涝综合指标能有效反映城市内涝点的内涝程度,其内涝设计值可以有效评价城市整体内涝程度;计算的区域整体内涝程度指标平均值能描述 LID(低影响开发)措施防涝设计的总体合理性,并且指标体系能有效反映内涝的时空分布特征,指标值采用无量纲量,评价方法更加科学.

关键词: 内涝势冲量;海绵城市;内涝程度;评价方法;LID 措施
中图分类号: TV122 **文献标志码**: A **文章编号**: 0367-6234(2019)03-0193-08

Construction of evaluation method of intrinsic degree of sponge city based on the momentum of waterlogging potential energy

SHEN Caihua[1,2], WANG Haoyue[1], CHU Mingsheng[1,3]

(1. Key Laboratory of Ministry of Education for Geomechanics and Embankment Engineering (Hohai University), Nanjing 210098, China;
2. Jiangsu Research Center for Geotechnical Engineering Technology (Hohai University), Nanjing 210098, China;
3. Ningbo Urban and Rural Planning Bureau Fenghua Branch, Ningbo 315500, Zhejiang, China)

Abstract: Urban waterlogging disasters frequently occur in China in recent years, and "Seeing the Sea" is very common in the rainy season. However, there is no unified evaluation index system to assess the degree of urban intrusion. In order to get a more complete evaluation index system of waterlogging degree of sponge city, the concept of the momentum of waterlogging potential energy was introduced based on the dynamic duration characteristics of urban intrinsic temporality. The indexes system for the evaluation of urban intrinsic degree, including the local indicatory instantaneous index, the local indwelling comprehensive index, the regional overall indifference index standard value, and the corresponding calculation and analysis methods were established. The Zhongjiao Future City in Fenghua District of Ningbo City was taken as a case. The SWMM model was used to calculate the intrinsic conditions in the region. Results show that the calculated local indwelling comprehensive index can effectively reflect the degree of internal flaws and the internal flaw design of the city. The value could evaluate the degree of the city's overall internality. The calculated average of the region's overall internal level can describe the overall rationality of the flood prevention design of the LID (low-impact development) measures, and the index system can effectively reflect the spatial and temporal distribution characteristics of the internal plutonium. Adopting dimensionless quantity, the evaluation method is proved more scientific.

Keywords: momentum of waterlogging potential energy; sponge city; degree of intrusion; evaluation method; LID measures

内涝通常指由于强降水或连续性降水超过城市排水能力致使城市内产生积水灾害的现象[1]. 一般城市的长时间积水内涝会影响城市交通、城市设施和居民正常生活等. 城市内涝风险评估尚处在研究与探索中,内涝灾害风险因子较多,主要包括地面高程、径流系数、排水系统等,而且城市人口居住密度也将与灾害可能造成的损失程度相关联,因此给评估带来了困难. 目前内涝程度主要是定性描述,还没有完善的统一的指标体系. 内涝程度的评价基本根据积水深度和积水时间(或积水流速)结合经验

收稿日期: 2018-07-06
基金项目: 国家自然科学基金重点项目(41830110);
国家重点研发计划重点专项(2017YFC1501102);
国家博士后基金(2015M571656);
浙江省交通运输厅科技计划(2016008,2015J09)
作者简介: 沈才华(1976—),男,副研究员,硕士生导师
通信作者: 沈才华,shencaihua@hhu.edu.cn

进行定性的综合评价,不能反映内涝全过程[2].

现有的内涝评估方法和思想主要有历史灾情评估法、情景模拟评估法、指标体系评估法. 历史灾情评估法要求有大量历史灾情数据资料,很多城市都难以获得. 情景模拟评估法本质就是指标体系评估法,目前已有一系列的水文模拟软件用于内涝灾害情景模拟. 较为常用的有 SWMM、InfoWorks、GIS、Mike Flood 模拟软件[3-7]. 指标体系评估法是由表征评价对象特点的多个指标构成的有机整体,符合实际情况,目前主要研究重点是风险评价指标体系:文献[8-9]从孕灾环境危险性、承灾体的脆弱性和暴露性 3 个方面考虑,选取了 26 个指标构建了英国曼彻斯特市洪水灾害风险评估体系,并借助主成分分析法对曼彻斯特市洪水风险进行了评估,找出了洪水灾害较为严重的区域. 文献[10]针对洪水灾害造成的损失,将投影追踪原理与风险指标相结合,提出了一种洪灾风险动态评估模型. 该模型采用分析时间数据的评估方法来综合分析评估风险的发展,借助投影追踪理论,应用最优投影矢量计算风险集群式,确认洪水灾害风险水平,并提出局部控制策略. 并且以黄山市屯溪区为例,验证模型的准确性,为洪水灾害风险评估提供新的方法.

相比于国外,我国风险评价指标体系的研究也趋于成熟,文献[11]针对我国目前最主要的灾害—洪涝灾害三要素(致灾因子、孕灾环境、承灾体)的作用机理进行了详细的分析,建立了洪灾损失评估模型,并以天津市滨海新区为实例,进行了实际评估与预测. 文献[12]在以往洪灾损失评价的基础上,以洪灾损失为核心,建立了洪灾风险评价体系,为洪水管理提供支持,最后结合实际,对评价体系进行了完善. 文献[13]从灾害风险表达式出发,概括了洪涝灾害风险评估的内容,并从指标确定及其他角度介绍了洪涝灾害损失评估的内容,为指标体系评估提供指导. 文献[14]基于以往内涝灾害风险评估的经验,以北京市为研究对象,构建了基于 DEA 模型的评价体系,并运用 CCR 模型对北京市 8 个城区的内涝风险进行了测度与评价. 文献[15]为探究城市洪涝背景下的地区海绵城市潜力评估方法,从海绵城市最具相关的降雨量、水污染、洪涝灾害和生态绿地 4 个方面展开,构建了海绵城市潜力指标体系.

综合上述已有研究可知,目前的内涝评价方法并不完善. 关于内涝程度评价指标,不同学者提出了不同的评价方法和评价指标,还没有形成一个统一的评价体系[16],且大部分研究对象是某个城市或者区域. 为了克服不完善的内涝评价指标体系,获得能反映内涝全过程特征的评价方法,本文基于内涝势冲量,提出了一种海绵城市内涝程度评价方法.

1 基于内涝势冲量的海绵城市内涝程度评价方法

1.1 局部内涝综合指标

根据强降雨或连续降雨特点,一般道路或小区积水深度历时曲线如图 1 所示,根据规范,当积水深度大于某一值 h_0(节点根据本地区的历史数据综合考虑给出)时,定义为内涝. 因此内涝历时曲线能很好地反映该道路或小区处的内涝严重程度,内涝深度越大、内涝时间越长则内涝越严重. 定义图中阴影部分面积,即内涝曲线与横坐标轴围成的面积为内涝势冲量,阴影部分面积越大则内涝势冲量越大,内涝也越严重.

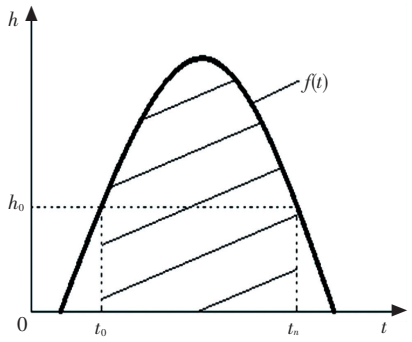


图 1 一般道路或小区积水深度历时曲线

Fig. 1 Duration curve of water depth in general roads or communities

局部节点的内涝势冲量公式为

$$\Omega = \int_{t_0}^{t_n} f(t)\,\mathrm{d}t. \tag{1}$$

式中:t_0 为内涝深度为 h_0 的起始时刻,h_n 为内涝深度为 h_0 的终止时刻,$f(t)$ 为内涝深度历时曲线,t 为内涝时长.

实际内涝深度的历时曲线很复杂,也很难通过积分获得该值,因此根据内涝势冲量特点,建立在某一内涝深度 h_i 时对应的阴影矩形面积为局部节点的内涝程度瞬时指标,如图 2 所示,针对某一内涝深度 h_i,其内涝深度超过 h_i 的持续时长为 t_i,定义该深度对应时长形成的矩形面积 $h_i t_i$ 为该点内涝深度为 h_i 的内涝程度瞬时指标,该局部节点的内涝程度瞬时指标 R_{T} 计算公式为

$$R_{\mathrm{T}} = h_i \cdot t_i. \tag{2}$$

式中 h_i 为内涝深度,t_i 为内涝深度超过 h_i 的内涝时长.

为了使评价指标更科学,采用无量纲化方法,评价指标值无量纲化后可以更客观地进行评价和运用,无量纲化的局部节点内涝程度瞬时指标 R'_{T} 计算公式为

$$R_{\mathrm{T}}^{'}=\frac{h_i}{h_0^*}\cdot\frac{t_i}{t_0^*}. \tag{3}$$

其中 $h_0{}^*$ 为内涝深度基准值，没有特殊要求时，可以根据《城镇内涝防治技术规范》[17] 取 15 cm，$t_0{}^*$ 没有特殊要求时，可以取下雨时长.

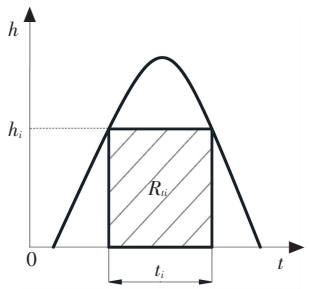


图 2　局部节点的内涝程度瞬时指标示意图

Fig.2　Diagram of instantaneous index of waterlogging degree of local nodes

局部内涝瞬时指标计算值只是反映了在该内涝深度下内涝势冲量，不能反映内涝全过程，因此采用梯形面积总和近似内涝全过程的内涝势冲量，(值的大小等于内涝曲线与横轴围成的面积)，理论上只要取足够多的内涝瞬时点，误差可趋于无穷小，如图 3 所示. 根据某内涝点内涝全过程曲线，将最大的内涝深度 $h_{\max}$ 等分为 N 份，每份高为 Δh，有

$$\Delta h=\frac{h_{\max}}{N}=h_1-h_0=h_i-h_{i-1}=\cdots=h_{N+1}-h_N, \tag{4}$$

式中 $i=1,2,\cdots,N$.

采用梯形面积总和近似等于内涝全过程的内涝势冲量，理论上当 N 趋于无穷大时，内涝水深 h_{i-1} 和 h_i 在内涝曲线内部围成的梯形面积 S_i 之和趋于内涝曲线构成的内涝势冲量理论值，节点内涝势冲量近似计算公式为

$$S_i=\frac{1}{2}(h_i-h_{i-1})\,(t_i+t_{i-1})\ ,\ i=1,2,\cdots,N. \tag{5}$$

因此局部内涝综合指标 $S^{\#}$ 的计算公式近似为

$$S^{\#}\approx\sum_{i=1}^{N}S_i=\frac{1}{2}\Delta h(t_0+t_N)+\Delta h\cdot\sum_{i=1}^{N-1}t_i. \tag{6}$$

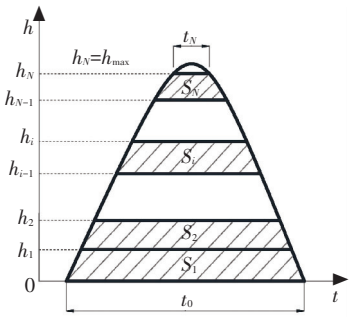
采用无量纲法，定义内涝势冲量为局部内涝综合指标，即

$$S_i^{'}=\frac{1}{2}\left(\frac{h_i-h_{i-1}}{h_0^*}\right)\left(\frac{t_i+t_{i-1}}{t_0^*}\right). \tag{7}$$

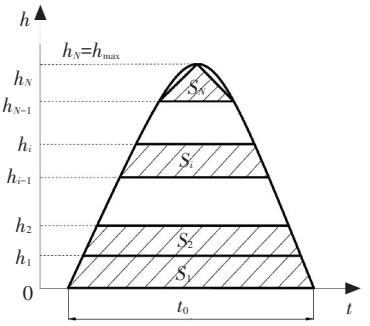
则有无量纲化的局部内涝综合指标 $R_{\mathrm{S}}^{'}$ 为

$$R_{\mathrm{S}}^{'}=\sum_{i=1}^{N}S_i^{'}=\frac{1}{2}\frac{\Delta h}{h_0^*}\left(\frac{t_0+t_N}{t_0^*}\right)+\frac{\Delta h}{h_0^*}\times\sum_{i=1}^{N-1}\frac{t_i}{t_0^*}. \tag{8}$$

根据规范，一般内涝深度大于 h_0^*，内涝时长大于 t_0^* 时，定义为内涝(特殊情况也可以取设计需要的 h_0^* 和 t_0^*)，因此局部内涝综合指标的计算值越大，内涝越严重，按此建立的局部内涝指标概念清晰，并采用无量纲量，容易判断和推广.



(a)最大内涝水位持续一段时间



(b)最大内涝水位为极值点

图 3　内涝全过程的内涝势冲量示意图

Fig.3　Diagramabout the momentum of waterlogging potential energy of the whole process of waterlogging

1.2　整体内涝综合指标

本文建立的内涝势冲量能有效反映内涝全过程的影响，基于内涝势冲量概念构建的内涝程度指标体系能很好反映强降雨过程中城市内涝程度. 对于整个区域而言，基于建立的局部内涝点指标体系，建立整体内涝指标，整体内涝程度采用节点内涝程度相对于子汇水区面积的加权平均值和变异系数表示，变异系数描述设计排水条件下内涝局部点之间的内涝局部差异程度，变异系数越大，说明有局部的内涝特别严重应进行重新设计，具体计算方法如下：

假设整体区域有 M 个点，从整体看，内涝点的程度与内涝的面积也有关，因此建立内涝点整体指标标准值 R_j，计算公式为

$$R_j=\frac{S_j}{S_{\mathrm{all}}}\times(R_{\mathrm{S}}^{'})_j. \tag{9}$$

其中：$j=1,2,\cdots,M$；S_j 为节点 j 汇水区面积；S_{all} 为总汇水区面积；$(R_S^{'})_j$ 为节点 j 的无量纲化的局部内涝综合指标，按照式(8)进行计算.

因此整体区域内涝实际值为

$$R^*=\sum_{j=1}^{M}R_j. \tag{10}$$

整体区域内涝指标标准值为

$$\bar{R} = \frac{R^*}{M}. \tag{11}$$

整体内涝指标的标准差为

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{M-1}} \cdot \sqrt{\sum_{j=1}^{M} (R_j - \bar{R})^2}. \tag{12}$$

整体内涝指标的变异系数为

$$C_v = \frac{\sigma}{\bar{R}} \times 100\%. \tag{13}$$

平均值反映了整体区域的内涝严重程度,标准差和变异系数反映了内涝的局部分配不均匀性,采用这两个指标进行内涝评价规划更科学,可以为海绵城市规划设计提供优化依据.

2 奉化区中交未来城内涝过程数值模拟

2.1 研究区概况

此次规划建设宁波市中交未来城地处奉化区北,规划区域位于剡江、东江之间,县江横穿其中,地势低,历年来常受洪涝灾害影响,属于宁波市奉化区的滞洪区. 属亚热带季风性气候,四季分明,温和湿润,降水量 1 350~1 600 mm. 台风洪涝是主要自然灾害之一.

中交未来城现状用地如图 4 所示,由于中交未来城具有“滞洪区”、雨量大的特点,因此内涝问题是中交未来城规划必须克服的难题,有必要利用海绵城市规划理念和方法对规划后的内涝情况进行分析,为设计优化提供指导.

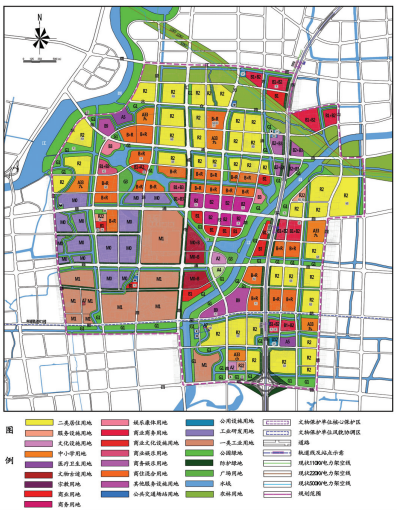


图 4 中交未来城现状用地图

Fig.4 Current situation of land use of Zhongjiao Future City

2.2 模型构建

SWMM 模型是一个目前广泛应用于城市暴雨径流水量、水质的模拟以及洪涝灾害预报的模型,用来模拟研究城市的降雨径流和污染物的运动过程,包括地表径流和排水管网中的水流,雨洪调蓄过程以及水质的评价影响[18]. 本文根据图 4 规划用地性质构建雨洪分析数值模型.

区域内排水管网主要沿主干道路铺设,子流域产生的径流就近排入管网. 根据雨水管网、地形、地貌等资料,将研究区概化成 1 072 个子汇水区域,如图 5 所示,共有 315 条管段、322 个管网节点、3 个管网末端排放口,如图 6 所示. 排水管道总长度为 161 401.32 m,两节点间管道长度在 20~550 m 之间.

图 5 中交未来城子汇水区概化图

Fig.5 Generalized map of subcatchment of Zhongjiao Future City

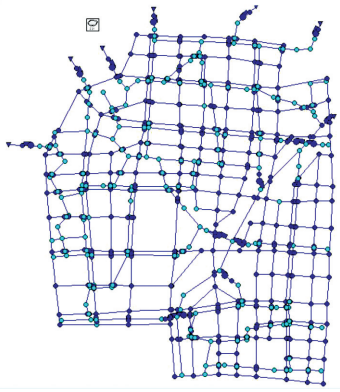


图 6 SWMM 中的节点和管网概化图

Fig.6 Generalized map of nodes and conduits network of SWMM

2.3 模型参数选择

1)子汇水区参数设置.子汇水区的面积大小、漫流宽度、平均坡度、检查井底标高等信息根据规划资料确定,子汇水区的曼宁系数、洼蓄深、不透水区中无洼不透水面积比例等参数按经验取值[19]:商业区、住宅区和其余地块的不渗透性分别取 0.95、0.7、0.65;透水区和不透水区的曼宁粗糙系数分别取 0.24、0.001 2;透水区和不透水区的洼蓄深分别取 5 mm和 3 mm;不透水区中无洼不透水面积比取 50%. 另外,子汇水区的渗透模型采用霍顿模型,相应的霍顿参数:最大下渗率、最小下渗率、渗透衰减系数分别取 76.1 mm/h、3.35 mm/h、3.5 h^{-1}. 管道粗

糙系数根据材质取 0.013.

2）LID 措施及其参数. 为了有效改善区域生态环境，提高水资源利用率，涵养地下水，在该区域添加 LID 措施. 根据规划资料，LID 措施主要有 3 种：下凹式绿地、绿色屋顶、透水铺装. 根据规划，用地为景观绿地、公园绿地性质的子汇水区设置为下凹式绿地；根据规划，针对商业用地和居住用地设置绿色屋顶；透水铺装根据规划，取次干道和公共交通场站用地进行设置. 布设的下凹式绿地面积为 1.68 hm^2，滞蓄深度为 100 mm；绿色屋顶的布设总面积为 1.24 hm^2，排水垫层的厚度为 200 mm，孔隙比为 0.5，糙率为 0.15；透水铺装的面积为 1.47 hm^2，路面层的厚度为 200 mm，孔隙比为 0.2，渗透性为 0.01；其余的参数参照海绵城市设计指南和相关工程实例[20-23].

2.4　奉化区降雨历时曲线

短历时暴雨强度公式采用奉化区水利局统计计算公式，即

$$q = \frac{799.935(1 + 0.75\lg P)}{(t + 2.08)^{0.508}}. \qquad (14)$$

式中：q 为暴雨强度，L/(s · hm^2)；t 为降雨历时，min；P 为重现期，a.

降雨设计历时取 120 min，时间间隔为 1 min，雨峰相对位置 r 取 0.4. 主要分析 100 a 一遇工况，降雨过程线如图 7 所示.

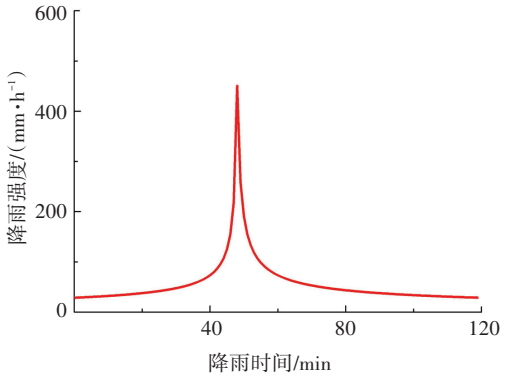


图 7　设计降雨过程线

Fig.7　Process line of design rainfall

3　模拟结果分析

根据建立的中交未来城 LID 海绵城市数学模型，分析 100 a 一遇 2 h 设计标准强暴雨下，局部节点的内涝过程，并利用基于内涝势冲量的海绵城市内涝程度评价方法对模型的内涝情况进行详细的分析评价.

3.1　100 a 一遇 2 h 降雨情况下局部节点内涝过程分析

从模拟结果显示，主要有 8 个节点出现内涝险情，出现严重内涝节点的具体分布如图 8 所示，可以发现内涝节点多分布于规划用地的西北区域，即县江上游区域.

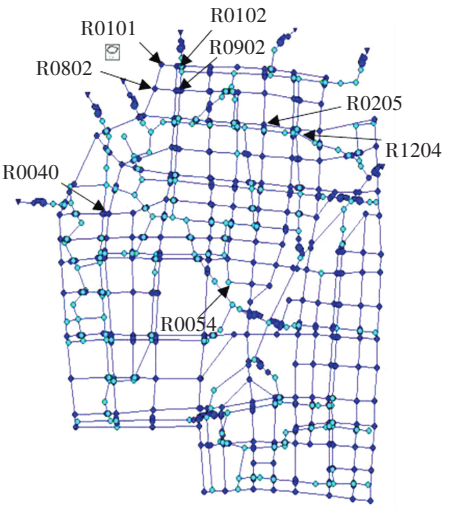


图 8　模型中内涝严重节点的示意图

Fig.8　Diagram of severe waterlogging nodes in the model

其中节点 R1204 内涝最严重，其历时过程曲线如图 9，内涝最大深度为 3.675 m，路面顶高程为 3.425 m，因此内涝最大深度 h_{max} 为 25 cm（3.675 − 3.425 = 0.25），将 h_{max} 等分为 5 份，每份高 Δh = 5 cm. 发生内涝的总时间为 180 min，内涝 5 cm 以上持续时间 169 min，内涝 10 cm 以上持续时间 108 min，内涝 15 cm 以上持续时间 40 min，内涝 20 cm以上持续时间 16 min.

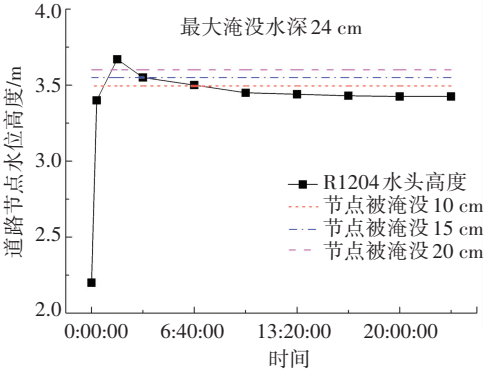


图 9　节点 R1204 的内涝历时曲线

Fig.9　Flood duration curve of node R1204

将内涝深度 h_i = 5、10、15、20 cm 以及分别对应的内涝时长 t_i = 169、108、40、16 min 代入式(3)进行计算，其中 h_0^* 根据城镇内涝防治技术规范[17]取 15 cm，t_0^* 取降雨时长 120 min. 通过计算可以得出在 100 a 一遇 2 h 降雨情况，R1204 在内涝深度 5、10、15、20 cm 情况下的局部内涝程度瞬时指标分别 0.47、0.60、0.33、0.18.

将 Δh、h_i、t_i、h_0^*、t_0^* 等值代入式(8)进行计算，可得到 R1204 的局部内涝程度综合指标为 0.96.

R1204 所对应的子汇水区面积为 14.363 6 m^2，

内涝节点所对应的的汇水区面积之和为 67.612 8 m^2,将数据代入式(9)~(11),可计算得出节点 R1204 整体内涝指标标准值为 0.242.

3.2 基于内涝势冲量的内涝程度评价方法对中交未来城内涝程度的评价

采用 3.1 节所介绍的方法,对 8 个内涝点分别计算其局部内涝程度瞬时指标、局部内涝程度综合指标、整体内涝指标标准值,结果见表 1,其中 R_T' 为无量纲化的局部内涝程度瞬时指标, R_S' 为无量纲化的局部内涝程度综合指标, R 为内涝点整体指标标准值, S 为子汇水区面积,h 积水深度,t 为积水时间.

表 1 100 a 一遇 2 h 强降雨内涝程度综合指标计算分析

Tab.1 Calculation and analysis of comprehensive index of waterlogging degree of once-in-a-century heavy rainfall in 2 hours

序号	节点编号	道路位置	S/ m^2	h/ cm	t/ min	R_T'	R_S'	$\bar{R}$
1	R0040	20(纵) 20(横)	10.409 0	5	159	0.44	1.042	0.160
				10	102	0.57		
				15	30	0.25		
				20	9	0.10		
2	R0054	18(纵) 24(横)	10.046 5	5	183	0.51	1.138	0.169
				10	109	0.61		
				15	25	0.21		
				20	2	0.02		
3	R1204	20(横) 方浦路	14.363 6	5	169	0.47	1.139	0.242
				10	108	0.60		
				15	40	0.33		
				20	16	0.18		
4	R0205	方欣路 北仓路	14.006 4	5	152	0.42	0.976	0.202
				10	94	0.52		
				15	26	0.22		
				20	7	0.08		
5	R0102	儒江路 盛源路	6.506 5	5	97	0.27	0.767	0.074
				10	78	0.43		
				15	45	0.38		
				20	15	0.17		
6	R0101	儒江路 东江路	0.83	5	98	0.27	0.771	0.009
				10	78	0.43		
				15	44	0.37		
				20	17	0.19		
7	R0802	东江路 方浦路	1.05	5	155	0.43	1.011	0.016
				10	84	0.47		
				15	43	0.36		
				20	9	0.10		
8	R0902	盛源路 方浦路	10.400 8	5	175	0.49	1.160	0.178
				10	102	0.57		
				15	48	0.40		
				20	10	0.11		

根据表 1 显示,针对节点 R0054 和节点 R0902,R0054 处内涝 5 cm 时间为 183 min,比 R0902 处长 8 min,但 R0054 处最大内涝深度超过 20 cm 的持续时间只有 2 min,而 R0902 内涝深度 20 cm 以上达到 10 min,比 R0054 处长 8 min. 可以认为 R0902 的内涝程度比 R0054 严重. 若仅采用某一内涝深度对应的内涝时长这样的瞬时指标来评价节点的内涝程度是不合理的,因为没有考虑时间尺度上的分布,而采

用局部内涝综合指标则能在整个降雨历时过程中对节点的内涝程度进行综合评价，该指标将不同内涝深度所对应的内涝时间用冲量的形式进行累加，最终得到的指标值能综合反映该点的内涝过程的特征. 前文中提到的 R0902 的内涝综合指标值为 1.160，而 R0054 的内涝综合指标值为 1.138，说明 R0902 的内涝程度比 R0054 更加严重，这也与前面的理论分析结果一致.

内涝点整体指标标准值是考虑了断面对应汇水区面积的内涝程度相对值，对于局部内涝点综合指标相近的节点，由于所对应的汇水区面积不相同，因此内涝点整体指标标准值也不同. 如 R0054、R1204 的内涝点综合指标值分别为 1.138、1.139，数值接近，而 R0054 对应汇水区面积为 10.046 5 m^2，R1204 对应的汇水区面积为 14.363 6 m^2，大于 R0054 对应的子汇水区面，因此可以认为节点 R1204 的内涝程度比 R0054 要严重. 而 R0054 整体指标标准值为 0.169，小于 R1204 对应的整体指标标准值 0.242，所以内涝整体指标可以反映内涝点对应的汇水区面积大小对整体内涝程度评价的影响.

目前的内涝点内涝程度评价一般采用国外常用的洪水风险评价标准，主要考虑洪水淹没深度和流速来进行风险程度评估，并以某一深度的瞬时指标来衡量，本质是本文提出的局部内涝瞬时指标，但是这类标准并不能反映内涝的历时全过程，因此没有本评价方法科学.

4　结　论

1）针对内涝点空间与历时过程特点，提出了内涝势冲量的概念，基于内涝势冲量，建立了城市局部内涝瞬时指标、局部内涝综合指标、区域整体内涝指标标准值等组成的评价城市内涝程度的指标体系及其具体计算分析方法，该指标体系计算概念明确，计算方法简洁明了，能够快速准确的对内涝程度进行评价.

2）内涝综合指标将整个降雨历时过程的不同内涝深度和对应的内涝时间用冲量的形式进行累加，与实际情况相符，更能综合反映节点的内涝过程特征.

3）内涝点整体指标标准值是考虑了断面对应汇水区面积的内涝程度相对值，同时该指标也反映了内涝点对应的汇水区面积大小对整体内涝程度评价的影响，能够真实反映节点内涝情况. 通过奉化区中交未来城实际工程，验证了评价方法的合理性. 所提出的内涝程度评价方法无论从参数选取还是计算结果与真实案例的对比都更加符合实际情况，在城市规划设计中可供参考.

参考文献

[1] 张炜，李思敏，时真男. 我国城市暴雨内涝的成因及其应对策略[J]. 自然灾害学报，2012，21(5)：180
ZHANG Wei，LI Simin，SHI Zhennan. Formation causes and coping strategies of urban rainstorm waterlogging in China[J]. Journal of Nature Disasters，2012，21(5)：180

[2] 李保建，詹健. 基于 SWMM 模型的南昌市青山湖片区雨洪模拟研究[J]. 工业用水与废水，2017，48(5)：33
LI Baojian，ZHAN Jian. Simulation study on rainfall flood of Qingshan Lake area in Nanchang by SWMM model[J]. Industrial Water & Wastewater，2017，48(5)：33

[3] SUN N，HALL M，HONG B，et al. Impact of SWMM catchment discretization：case study in Syracuse，New York[J]. Journal of Hydrologic Engineering，2014，19(1)：223

[4] GIRONAS J，ROESNER L A，ROSSMAN L A，et al. A new applications manual for the storm water management model (SWMM)[J].Environmental Modelling & Software，2010，25(6)：813

[5] RUBINATO M，SHUCKSMITH J，SAUL A J，et al. Comparison between InfoWorks hydraulic results and a physical model of an urban drainage system[J]. Water Science & Technology：A Journal of the International Association on Water Pollution Research，2013，68(2)：372

[6] 韩敏，赵耀. 基于 MIKE FLOOD 和 ArcObjects 的洪水淹没模拟及可视化[C]//第 27 届中国控制会议.北京：北京航空航天大学出版社，2008
HAN Min，ZHAO Yao. Simulation and visualization of flood submergence based on MIKE FLOOD and ArcObjects[C]//The 27th Chinese Control Conference (International). Beijing：Beihang University Press，2008

[7] PHONG T，RAJIB S，GUILLAUME C，et al. GIS and local knowledge in disaster management：a case study of flood risk mapping in Viet Nam[J]. Disasters，2010，33(1)：152

[8] XIAO F，MCCALLEY J D. Power system risk assessment and control in a multiobjective framework[J]. IEEE Transactions on Power Systems，2009，24(1)：78

[9] ALEKSANDRE K，GINA C. Surface water flooding risk to urban communities：analysis of vulnerability，hazard and exposure[J]. Landscape & Urban Planning，2011，103(2)：185

[10] ZHAO J，JIN J，GUO Q，et al. Dynamic risk assessment model for flood disaster on a projection pursuit cluster and its application[J]. Stochastic Environmental Research & Risk Assessment，2014，28(8)：2175

[11] 冯平，崔广涛，钟昀. 城市洪涝灾害直接经济损失的评估与预测[J]. 水利学报，2001，32(8)：64
FENG Ping，CUI Guangtao，ZHONG Yun. On the evaluation and prediction of urban flood economic loss[J]. Journal of Hydraulic Engineering，2001，32(8)：64

[12] 付意成，魏传江，王启猛，等. 区域洪灾风险评价体系研究[J]. 灾害学，2009，24(3)：27
FU Yicheng，WEI Chuanjiang，WANG Qimeng，et al. Study on regional flood risk assessment system[J]. Journal of Catastrophology，2009，24(3)：27

[13] 葛鹏，岳贤平. 洪涝灾害评估研究综述[J]. 南通大学学报(自然科学版)，2012，11(4)：68
GE Peng，YUE Xianping. Review on assessment of flood and water-

logging disaster[J]. Journal of Nantong University (Natural Science Edition), 2012, 11(4):68

[14]朱文军. 北京城区内涝风险评估及控制研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2012
ZHU Wenjun. The risk assessment of waterlogging and the suggestion of management in Beijing city[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2012

[15]王志杰,周平,刘川昆,等.海绵城市潜力评估方法及地下排水系统[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2018, 50(3):118
WANG Zhijie, ZHOU Ping, LIU Chuankun, et al. A potential evaluating methods of sponge city and on the underground drainage system[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2018, 50(3): 118

[16]糜宁. 小尺度区域内涝风险评价指标体系研究—以湖北郧县老城区为例[D]. 武汉: 武汉科技大学, 2016
MI Ning. Study of waterlogging risk assessment system in small-scale region—the old city in Yunyang County of Hubei Province as an example [D]. Wuhan: Wuhan University of Science and Technology, 2016

[17]城镇内涝防治技术规范:GB 51222—2017[S]. 北京: 中国计划出版社, 2017
Technical code for urban flooding prevention and control: GB 51222—2017[S]. Beijing: China Planning Press, 2017

[18]余嵘, 赵丹, 刘渊博,等. SWMM 模型中不同 LID 措施在排水系统模拟中的应用[J]. 中国农村水利水电, 2016(1):35
YU Rong, ZHAO Dan, LIU Yuanbo, et al. The application of different LID measures of SWMM model in the drainage system in simulation[J]. China Rural Water and Hydropower, 2016(1):35

[19]DIETZ M E, CLAUSEN J C. Stormwater runoff and export changes with development in a traditional and low impact subdivision[J]. Journal of Environmental Management, 2008, 87(4):560.

[20]HUBER W C, SINGH V P. EPA storm water management model-SWMM[J]. Computer Models of Watershed Hydrology, 1995, 22: 783

[21]许萍, 何俊超, 任心欣,等. 基于 SWMM 模型的城市道路 LID 设施设计参数优化研究[J]. 水电能源科学, 2016, 34(2):21
XU Ping, HE Junchao, REN Xinxin, et al. Optimization of LID design parameters of urban road based on SWMM model[J]. Water Resource and Power, 2016, 34(2):21

[22]张少钦, 吴珊, 李俊. 全局敏感性分析在 LID 措施选择中的应用研究[J]. 中国给水排水, 2017, 33(19):125
ZHANG Shaoqin, WU Shan, LI Jun. Application of global sensitivity analysis in selection of LID measures[J]. China Water & Wastewater, 2017, 33(19):125

[23]BEDAN E S, CLAUSEN J C. Stormwater runoff quality and quantity from traditional and low impact development watersheds[J]. JAWRA Journal of the American Water Resources Association, 2010, 45(4):11

(编辑 魏希柱)

(上接第192页)

[5] 贾俊芳, 黄荣松. 基于出行时间最少的市郊铁路合理站间距研究[J]. 交通信息与安全, 2013, 31(5): 74
JIA Junfang, HUANG Rongsong. Minimum travel time-based spacing between suburban railway stations [J]. Journal of Transport Information and Safety, 2013, 31(5): 74

[6]左忠义, 赵汉鲲. 城市轨道交通站间距优化研究[J]. 大连交通大学学报, 2014, 35(2): 25
ZUO Zhongyi, ZHAO Hankun. Study on optimal spacing of rail transit station [J]. Journal of Dalian Jiaotong University, 2014, 35(2): 25

[7]石瑜. 基于 GIS 的城市地铁站点布设研究[D]. 石家庄: 石家庄铁道大学,2014
SHI Yu. Research on the urban metro station layout based on GIS [D]. Shijiazhuang: Shijiazhuang Tiedao University, 2014

[8]ZHAO J, DENG W, SONG Y, et al. Analysis of metro ridership at station level and station-to-station level in Nanjing: an approach based on direct demand models [J]. Transportation, 2014, 41(1): 133

[9]EWING R, CERVERO R. Travel and the built environment: a meta-analysis [J]. Journal of the American Planning Association, 2010, 76(3): 265

[10]李君, 叶霞飞. 城市轨道交通车站分布方法的研究[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2004, 32(8): 1009
LI Jun, YE Xiafei. Studies on distribution of stations of urban mass transit [J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2004, 32(8): 1009

[11]秦萍, 陈颖翱, 徐晋涛,等. 北京居民出行行为分析:时间价值和交通需求弹性估算[J]. 经济地理, 2014, 34(11): 17
QIN Ping, CHEN Ying'ao, XU Jintao, et al. Travel behavior analysis for the residents in Beijing: value of time and travel demand elasticity estimates [J]. Economic Geography, 2014, 34(11): 17

[12]鲁钰雯. 寒地城市可步行性测度及优化研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2017
LU Yuwen. The walkability measurement and optimization study of winter cities [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2017

[13]徐威鸿. 城市轨道交通系统之复杂网络特征及乘客出行特征研究[D].天津:天津大学, 2014
XU Weihong. A research on the complex network characteristics of urban railway traffic system and the passenger traffic feature [D]. Tianjin: Tianjin University, 2014

[14]马超云, 毛保华, 梁肖, 等. 地铁列车节能运行惰行控制研究[J]. 交通信息与安全, 2010, 28(2): 37
MA Chaoyun, MAO Baohua, LIANG Xiao, et al. Coast control of urban train movement for energy efficiency [J]. Journal of Transport Information and Safety, 2010, 28(2): 37

[15]杨俭, 李发扬, 宋瑞刚, 等. 城市轨道交通车辆制动能量回收技术现状及研究进展[J]. 铁道学报, 2011, 33(2): 26
YANG Jian, LI Fayang, SONG Ruigang, et al. Review of the utilization of vehicular braking energy in urban railway transportation [J] Journal of the China Railway Society, 2011, 33(2): 26

[16]尹航, 蒋涛, 张言伟, 等. 列车牵引计算分析及仿真[J]. 大连交通大学学报, 2013, 34(1): 80
YIN Hang, JIANG Tao, ZHANG Yanwei, et al. Analysis and simulation of train traction computation [J]. Journal of Dalian Jiaotong University, 2013, 34(1): 80

(编辑 魏希柱)