DOI:10.11705/j.issn.1672-643X.2019.02.21

城市排水管网脆弱性变权评估研究

陈伟珂, 丁 聿
(天津理工大学 管理学院, 天津 300384)

摘 要: 为使“海绵城市”与城市排水管网融合发展,协同作用缓解城市内涝。以天津市为例,从“暴露度-敏感性-适应能力”三个维度构建了城市排水管网脆弱性评价指标体系;采用惩罚型变权综合评价模型进行城市排水管网的脆弱性“诊断”;利用 MATLAB 实现 GM(1,1)模型对城市排水管网的脆弱性综合指数预测。研究结果表明:在 2008-2017 年期间,天津市城市排水管网脆弱性指数在 0.442~0.652 之间波动,总体呈上升走势。由预测结果可知,该趋势一直延伸至 2018-2020 年,脆弱度稳步于“轻度”;通过变权评价结果与常权评价结果的对比可知惩罚型变权综合评价模型能够消除常权评价结果中的泡沫,提高评价结果的客观性。

关键词: 城市排水管网; 脆弱性评估; 惩罚型变权; 灰色预测

中图分类号:TU992　　**文献标识码**: A　　**文章编号**: 1672-643X(2019)02-0136-08

Evaluation of the vulnerability of urban drainage networks

CHEN Weike, DING Yu
(*School of Management, Tianjin University of Technology, Tianjin* 300384, *China*)

Abstract: In order to integrate the “sponge city” with the urban drainage network, synergy can alleviate urban guilt. The study takes Tianjin as an example to construct the vulnerability evaluation index system of urban drainage network from the three dimensions of “exposure - sensitivity - adaptive ability”. The punitive variable weight comprehensive evaluation model was used to conduct the “diagnosis” of the vulnerability of urban drainage networks. The GM (1, 1) model in MATLAB was used to predict the vulnerability index of urban drainage network. The results indicated that the vulnerability index of urban drainage network in Tianjin fluctuated between 0.442 and 0.652, and the overall trend was upward during the period of 2008-2017. According to the forecast results, the trend extend to 2018-2020, and the vulnerability is steadily in the “light” range. Through comparison between the results of the variable power evaluation and the constant power evaluation, the comprehensive evaluation model of the punitive variable can eliminate the bubble in the constant power and improve the objectivity of the evaluation result.

Key words: urban drainage network; vulnerability assessment; punitive variable weight; grey prediction

1 研究背景

近10年来,在城市化规模急剧扩张的同时,城市内涝等“城市病”仍在不断发生。我国60%以上的城市都经历过城市内涝灾害[1]。以往解决城市内涝灾害主要依靠提高城市排水管网的泄水能力,但现已无法满足城市排涝需求。“海绵城市”的概念提出后,我国在发展战略层面将其作为城市发展中重要的“里子工程”进行推进,其与城市排水管网相辅相成,协同作用缓解城市内涝[2]。若要实现二者的高度融合须以探明城市排水管网基本现状为基石。城市体检作为现状“诊断”的重要手段,对二者高度的功能性融合起着至关重要的基础性作用。

城市体检这一理念提出后,学者在宏观层面以城市整体[3-4]、城市经济[5-6]、城市生态环境[7]等为研究对象,对城市脆弱性内涵[8-10]、脆弱性影响因素[8]、脆弱性评价[8,11-12]、脆弱性测度[13]等方面进行了深入研究。在研究思路方面主要是利用指标、

收稿日期:2018-09-09;　**修回日期**:2018-11-07
基金项目:国家社会科学基金项目(17BGL210)
作者简介:陈伟珂(1961-),女,天津人,博士,教授,博士生导师,主要研究方向为安全与风险预警。
通讯作者:丁 聿(1993-),男,山东济宁人,硕士研究生,主要研究方向为公共安全。

重要度进行综合评价计算[14-16],主要包括综合指数、聚类分析等综合测度方法[17-22]。通过文献研究可知,以往学者进行的相关研究多集中于宏观层面,其研究成果虽然能够反映城市作为一个整体系统应对介入扰动因素的抵抗能力,但对某一具体“城市问题”的“治愈”效果甚微。此外,研究者多采用的是静态的常权评价方法,无法反映各指标重要度在研究期内表现出的动态性。而变权模型可弥补静态常权评价方法的缺陷,可更好地体现各个指标在不同时期决策过程中的作用。变权模型现已应用于城市宏观领域脆弱性评价[23]、短期风速预测[24]、地下含水层突水脆弱性和危险性评价[25-26]等领域,并取得了丰硕的研究成果。

在构建脆弱性评价指标体系研究中,国内学者主要是通过 PSR(“压力 - 状态 - 响应”)[27]、PSE(“压力 - 敏感 - 弹性”)[28]、SRP(“生态敏感性 - 生态恢复力 - 生态压力度”)[29]、SWAT[30]等模型进行脆弱性评价指标体系的构建。在国际上,由 IPCC[31](Intergovernmental Panel on Climate Change)于 1996 年提出的脆弱性由暴露度、敏感性和适应能力决定这一观点得到了普遍认可;2007 年,Polsky 等[32]基于 IPCC 的重要观点构建了 VSD(Vulnerability Scoping Diagram)模型,该模型突出了脆弱性形成的内在机理。目前,基于 VSD 模型的学术研究成果表现出较强的科学性与广泛的应用性[33-35]。

鉴于此,本研究以天津市城市排水管网为例,采用 VSD 模型构建城市排水管网脆弱性评价指标体系,利用惩罚型变权综合评价模型进行天津市排水管网脆弱性评价,并借鉴灰色预测 GM(1,1)模型进行城市排水管网脆弱性警情预测。延拓城市排水管网体检研究思路,丰富脆弱性研究内容,为城市排水管网与“海绵城市”进行高度功能性融合提供理论支撑,缓解城市排涝减灾的压力。

2 研究思路与关键步骤

2.1 研究思路

根据天津市城市排水管网自身特点、所处环境、气候条件以及运维现状,同时参考相关设计规范和专项规划,从暴露度、敏感性和适应能力三个维度构建适用于城市排水管网脆弱性评价的指标体系,将其作为城市排水管网体检的标尺,在此基础上进行数据归一化处理及指标变权权重的确定。上述步骤完成后,将综合指数法与变权模型相结合,进行城市排水管网脆弱性综合测度,并划分脆弱性等级,从而探明天津市城市排水管网实际状况,达到城市排水管网体检的目的;最后,运用 MATLAB 进行新陈代谢 GM(1,1)预测模型的代码编写,实现对天津市排水管网脆弱程度的预测。具体研究思路如图 1 所示。

2.2 天津市排水管网脆弱性评价指标体系的构建

2.2.1 研究区简况 天津市位于华北平原东北部、海河流域下游,属大陆性气候,降雨主要集中于夏季,年平均降雨量为 550 ~ 700 mm,6 - 7 月份的降雨量占全年总降雨量的 80% 左右。天津市共包括 18 个县区,地势总体走势为南低北高,居民住宅、工矿以及交通用地约占天津市总土地面积的 22%,园林牧地约占 6%,城区内雨水管道约 1 800 km,雨水泵站约 120 座,雨水管网普及率约为 80%,但面对强降雨天气,城市内涝仍有发生,例如,2016 年 7 月,天津市出现连续两天的强降雨,造成城区道路积水 52 处,海河水位持续较高,附近下沉路段全部淹没。研究立足于“海绵城市”战略背景,针对天津市具体情形对排水管网进行脆弱性“诊断”,以确定天津市城市排水管网脆弱性指数及脆弱程度。

2.2.2 脆弱性评价指标体系的构建 研究针对天津市城市排水管网的实际运行状态,在借鉴前人学术成果[36]的基础之上,利用 VSD 模型构建天津市城市排水管网脆弱性评价指标体系(表 1)。根据本研究具体内容,将城市排水管网脆弱性评价指标区分为正向指标和负向指标,其中正向指标表示指标值越大,城市排水管网的状态越佳,其脆弱程度越低;反之即为负向指标。

2.3 数据的标准化处理

借鉴功效系数法[37],采用公式(1)对正属性指标进行标准化处理,采用公式(2)对负属性指标进行标准化处理。

$$L_i^* = \begin{cases} 1 - \dfrac{m_i}{l_i} \times 0.15, & l_i \geqslant m_i \\ \dfrac{l_i}{m_i} \times 0.85, & 0 < l_i < m_i \end{cases} \tag{1}$$

$$L_i^* = \begin{cases} 1 - \dfrac{l_i}{m_i} \times 0.15, & 0 < l_i \leqslant m_i \\ \dfrac{m_i}{l_i} \times 0.85, & m_i < l_i \end{cases} \tag{2}$$

式中:L_i^* 为指标的标准值;l_i 为指标的原始值;m_i 为指标实际值的否定水平,主要确定依据为:(1)参考国内及天津市相关设计规范与标准;(2)与国内其他相似省市现状进行横向对比;(3)市政基础设施相关领域专家经验确定;(4)依据天津市平均水

平进行趋势外推;(5)参考相关学者研究成果。

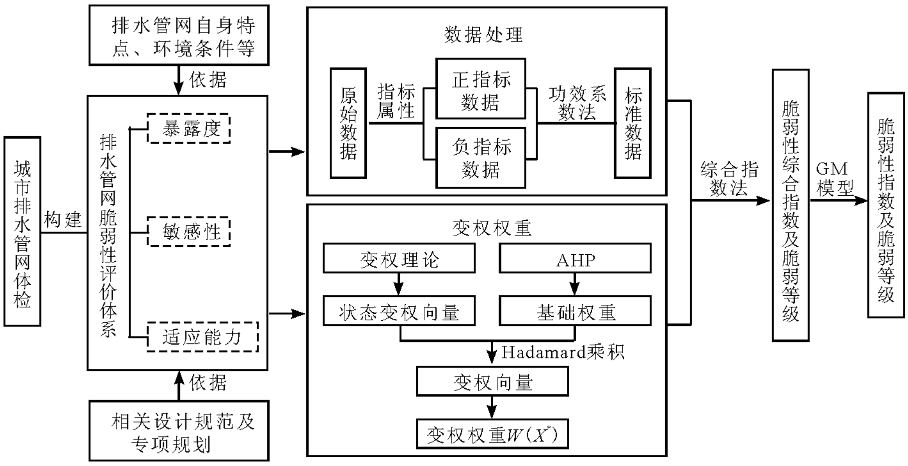

图1 研究思路

表1 城市排水管网脆弱性评价指标体系

目标	准则	指标	属性	基础权重	否定值
城市排水管网脆弱性评价指标体系 A	暴露度 A_1	透水地面率 C_1	正	0.0701	0.69
		土壤渗透系数 C_2	正	0.0550	0.48
		水面率 C_3	正	0.0572	0.64
		绿化覆盖率 C_4	正	0.0609	0.61
		降雨强度 C_5	负	0.0335	0.50
		平均雨量 C_6	负	0.0335	0.47
		人口密度 C_7	负	0.0515	0.88
	敏感性 A_2	管道坡度 C_8	正	0.0596	0.90
		管道直径 C_9	正	0.0528	0.74
		管道服役年限 C_{10}	负	0.0440	0.76
		管道粗糙程度 C_{11}	负	0.0267	0.63
		排水口数量 C_{12}	正	0.0378	0.72
		暴雨重现期 C_{13}	正	0.0291	0.49
		管网连通指数 C_{14}	正	0.0608	0.89
		各级管网普及率 C_{15}	正	0.0651	0.95
	适应能力 A_3	排水管网建设投入比 C_{16}	正	0.0382	0.78
		排水管网运行管理投入比 C_{17}	正	0.0360	0.91
		雨水泵站数 C_{18}	正	0.0630	0.80
		雨水入水口泄水速度 C_{19}	正	0.0615	0.76
		雨水管道总长度 C_{20}	正	0.0637	0.79

数据及资料来源:本论文所涉及的2008－2017年的研究数据与资料在天津市市政设计院、天津市排水管理处、天津市水务局、天津市统计局等相关部门的支持下收集所得,对于个别年份缺失的数据通过趋势外推等方法取得;主要参考规范包括:《城市排水工程规划规范》(GB50318－2017)、《室外排水设计规范》(GB50014－2006)(2016年版)、《城市防洪规划规范》(GB51079－2016)、《海绵城市建设技术指南－低影响开发雨水系统构建》(中华人民共和国住房和城乡建设部2014)、《天津市排水专项规划(2008－2020年)》、《天津市中心城区排水防涝综合规划(2016－2025年)》、《天津市排涝总体规划(2011－2020年)》、《天津市海绵城市建设专项规划(2016－2030年)》等;2018－2020年期间的天津市城市排水管网脆弱性综合指数通过MATLAB编程构建新陈代谢GM(1,1)模型预测得到。

2.4　变权权重的确定

2.4.1　惩罚型状态变权向量的构造　借鉴相关学术成果[38],构造适用于城市排水管网脆弱性研究的惩罚型状态变权向量:

$$S_i(L^*) = \begin{cases} e^{-a(L_i^* - b)}, & 0 \leqslant L_i^* \leqslant b \\ 1, & b < L_i^* \leqslant 1 \end{cases} \tag{3}$$

式中:L_i^* 为指标标准值,由公式(1)、(2) 得出;a 为惩罚系数;b 为标准否定值。通过专家经验法,将 b 定为 0.7,a 定为 0.71624。

2.4.2　惩罚型变权权重的确定　将 $S_i(L^*)$ 与基础权重向量 W 进行归一化乘积处理后便可得到惩罚型变权向量,如公式(4) 所示。

$$W(L^*) = (w_1(L^*), w_2(L^*), \cdots, w_n(L^*)) \tag{4}$$

惩罚型变权向量确定之后,以各个评价指标的变权分量与总量之比作为各指标的变权权重,其计算公式如公式(5) 所示。

$$W_i(L^*) = \frac{w_i S_i(L^*)}{\sum_{i=1}^{n}(w_i S_i(L))} \tag{5}$$

2.5　惩罚型变权综合评价模型的构建

运用综合指数法构建城市排水管网惩罚型变权综合评价模型:

$$V = \sum_{i=1}^{n}(W_i(L^*) L_i^*) \tag{6}$$

式中:V 为城市排水管网脆弱性评价综合指数,其值越大意味着城市排水管网脆弱程度越小;$W_i(L^*)$ 为脆弱性评价指标的变权权重;L_i^* 为脆弱性评价指标的标准值。

2.6　城市排水管网脆弱性等级的划分

为了便于进行脆弱性比较,本研究参考相关学者的研究[36],并根据城市排水管网脆弱性评价综合指数值 V, 进行城市排水管网脆弱性等级划分,具体划分情形见表 2。

2.7　城市排水管网脆弱性预测

采用灰色预测模型对天津市 2018－2020 年的城市排水管网脆弱性指数进行预测。由于灰色预测具有良好的鲁棒性,现已广泛应用于用电量预测[39-40]、就业发展趋势预测[41]等领域。新陈代谢 GM(1,1)模型则是灰色预测模型中最为常用且精度较高的短期预测模型。

根据上文得出的惩罚型变权综合脆弱性指数,运用 MATLAB 实现城市排水管网脆弱性指数的预测。通过残差 M、后验差 C、小误差概率 p 以及关联度 r 来检验该模型的精度级别,精度检验标准见表 3。

表 2　城市排水管网脆弱性等级

V 值区间	等级	脆弱度	等级含义
$0.85 \leqslant V < 1.00$	Ⅰ	无	城市排水管网完全满足城市排水需求,排水及时,无积水,排水设施发展与城市发展相配套
$0.65 \leqslant V < 0.85$	Ⅱ	轻度	城市排水管网基本满足城市排水需求,但排水稍慢,有积水出现,排水设施发展略有滞后
$0.45 \leqslant V < 0.65$	Ⅲ	中度	城市排水管网逐渐开始无法满足城市排水需求,排水较慢,存在积水,排水设施发展渐有滞后
$0.25 \leqslant V < 0.45$	Ⅳ	重度	城市排水管网已经无法满足城市排水需求,排水缓慢,积水情况较严重,排水设施发展较为滞后
$0 \leqslant V < 0.25$	Ⅴ	超重度	排水设施形同虚设,功能丧失,积水严重,城市内涝灾害易发

表 3　预测精度检验标准

预测精度级别	残差 M	后验差 C	小误差概率 p	关联度 r
一级	<0.01	<0.35	≥0.95	≥0.90
二级	0.01～0.05	0.35～0.50	0.80～0.95	0.80～0.90
三级	0.05～0.10	0.50～0.65	0.70～0.80	0.70～0.80
四级	0.10～0.20	0.65～0.80	0.60～0.70	0.60～0.70

3　评价结果与分析

3.1　天津市城市排水管网脆弱性演变综合分析

采用惩罚型变权综合评价模型对天津市2008－2017年城市排水管网脆弱性综合评价指数计算，计算结果见表4。为进一步说明变权评价思路具有更强的客观性，将常权权重的评价结果与变权权重的评价结果进行对比，如图2所示。由图2可知，惩罚型变权综合评价结果普遍低于传统的常权综合评价结果，这正是惩罚型变权综合评价方法所带来的“惩罚”效应，其消除了传统综合评价方法中存在的不合理的泡沫，进而提高了最终评价结果的科学性与客观性。

表4　2008－2017年天津市城市排水管网脆弱性综合指数

年　份	脆弱性指数	脆弱度等级
2008	0.453	Ⅲ
2009	0.446	Ⅳ
2010	0.481	Ⅲ
2011	0.442	Ⅳ
2012	0.556	Ⅲ
2013	0.464	Ⅲ
2014	0.545	Ⅲ
2015	0.601	Ⅲ
2016	0.571	Ⅲ
2017	0.652	Ⅱ

单独分析惩罚型变权评价结果，在2008－2017年期间，天津市城市排水管网脆弱性指数总体呈现上升趋势，但存在上下波动。脆弱程度总体由“中度”演进至“轻度”，脆弱性等级在2017年首次进入Ⅱ级。

在过去10年中，天津市陆续出台了《天津市排水专项规划》、《天津市排涝总体规划》、《天津市海绵城市建设专项规划》等一系列全新建设规划，在原有规划的基础上将天津市中心城区以及外环线以外的各县区进行了统筹规划，整合了服役时间较长的排水泵站，对市内常积水区域进行了排水设施的升级改造与扩建，排水管网普及率约达80%。相关规划的制定与颁布表明天津市逐渐加强了城市排水管网的建设，加快城市排水管网发展以满足城市排涝需求，使得天津市城市排水管网脆弱性逐渐降低。

在2017年，天津市城市排水管网脆弱度首次达到“轻度”状态，排水管网已基本满足城市排涝需求，虽然已达到“轻度”状态，但其脆弱性综合指数也仅仅是处于区间边缘，仍然存有跌至“中度”状态的风险。因此，针对天津市具体积水情况，“海绵城市”的建设可优先将重点集中于常积水片区，缓解重点区域排水管网泄水压力。

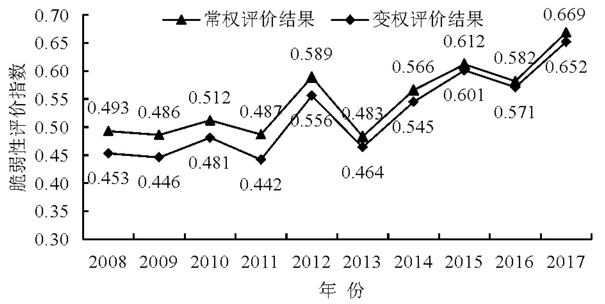

图2　天津市城市排水管网脆弱性发展走势

3.2　“暴露度－敏感性－适应能力”分析

通过惩罚型变权综合评价模型，分别计算天津市城市排水管网在“暴露度”、“敏感性”、“适应能力”维度的变权指数，结果如图3所示。总览图3可知，在“暴露度－敏感性－适应能力”三个维度的评价结果的变化趋势总体符合城市排水管网脆弱性综合评价结果的走势，其中，“适应能力”这一维度的评价结果均高于其他两个维度，说明天津市相关政府部门与市政建设部门对城市排水管网的投资在市政建设投资中占有一定的比例且逐年增加，但需要注重资金的监管与高效利用。

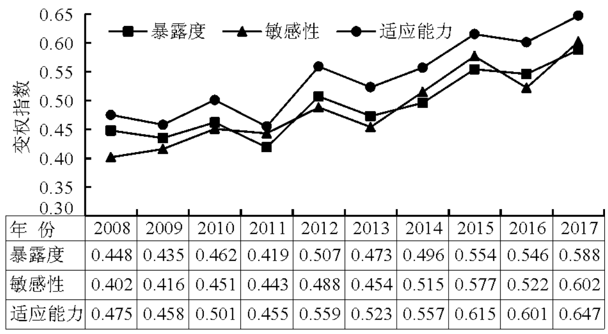

图3　“暴露度－敏感性－适应能力”变权指数走势

3.2.1　“暴露度”分析　在暴露度这一维度中，透水地面率和绿化覆盖率对天津市城市排水管网暴露度影响较大。天津市在城市发展及建设过程中，将“海绵城市”的建设理念融入其中，透水地面率由25%逐步增加至接近40%，绿化覆盖率现已增长至38%。天津市面对汛期降雨较多的情形，采取了“源头控制”策略，如：停车场、小区道路等根据具体条件采用透水地面进行铺设；在道路两侧允许的前提下设置植草沟；旧城区进行改造时坚持低影响开发理念等。在暴露度中，雨强、降雨量难以进行人为

控制，因此，“海绵城市”的建设应在因地制宜的基础上，将重点置于对暴露度影响较大的透水地面率、绿化覆盖率等方面，弥补城市排水管网功能盲区。

3.2.2　“敏感性”分析　在敏感性维度中，天津市城市排水管网敏感性与管网普及率、管网连通指数关系最为密切。《天津市排水专项规划》(2008 – 2020 年)将天津市主城区、滨海新区以及其他区县的管网普及率目标值分别定为 95%、90%、85%。2016 年，天津市中心城区排水管网普及率已由 2007 年的 70.06% 增加至 80.4%。排水管网普及率的提高在很大程度上降低了排水管网的敏感性。在 2013 和 2016 年，敏感性变权指数有所降低，主要是由于老城区排水管网出现不同程度的破损、老化及市财政限制所致。

目前天津市城市排水管网实际普及率与《天津市排水专项规划》中设定的目标普及率仍有较大差距；天津市旧城区排水管网存在着管道服役时间较长、管道老化严重以及管道建设标准偏低等多方面的问题。因此，天津市城市排水管网的规划与建设应集中于新区县排水管网的现代化建设和老城区排水管网的升级、改造。

3.2.3　“适应能力”分析　在适应能力维度中，雨水管道总长度、雨水泵站数所占权重最高，其对天津市排水管网的适应能力影响也较大。2008 – 2017 年期间，天津市中心城区雨水管道长度由 2008 年的 1 190 km 增加至 2017 年的 1 338 km、雨水泵站数由 2008 年的 98 座增加至 2017 年的 120 座；新城区排水管网的建设以及部分老城区排水管网的改建将天津市排水管网的排水能力由 2008 年的 671.0 m^3/s 提升到 2017 年的 1 940.3 m^3/s，排水能力的极大提高使得排水管网应对强降雨天气等不利因素的能力也不断提高。天津市相关政府部门对城市排水管网建设与改造的市政资金投入不断增加，但现阶段应更加注重投入资金的监管与高效利用。

4　天津市城市排水管网脆弱性指数预测

借助 Matlab 实现新陈代谢 GM(1,1)模型对天津市 2018、2019 和 2020 年的排水管网脆弱性综合指数进行预测，其预测结果分别为：0.672、0.690、0.700。结合表 3 所示的预测精度检验标准，新陈代谢 GM(1,1)模型的预测精度检验结果见表 5。

表 5　新陈代谢 GM(1,1)模型预测精度检验结果

预测年份	残差 M	精度级别	后验差 C	精度级别	小误差概率 p	精度级别	关联度 r	精度级别
2018	0.03	二级	0.10	一级	1.00	一级	0.85	二级
2019	0.02	二级	0.11	一级	1.00	一级	0.86	二级
2020	0.02	二级	0.10	一级	1.00	一级	0.81	二级

天津市城市排水管网脆弱性综合指数实际值与预测值的对比及发展趋势预测如图 4 所示，从图 4 不难看出，2008 – 2017 年期间，天津市城市排水管网脆弱性综合指数预测值总体走势符合实际评估结果的趋势；2018 – 2020 年预测期间，天津市城市排水管网脆弱性综合指数逐年增长但依然处于“轻度”状态，其状况并非完全乐观。

面对天津市城市排水管网未来发展趋势，在城市排水管网的规划与建设方面，天津市仍需加大对城市排水管网扩建、新建的资金投入，并提高资金利用效率，进一步提高城市排水管网的普及率、管网连通指数等重点指标值，同时实现老城区排水管网的全面升级与改造，提高天津市城市排水管网的整体现代化水平。

在“海绵城市”建设战略背景下，《天津市海绵城市建设技术导则(2016 版)》现已出台，针对天津市排水管网建设及改进存有困难的区域，“海绵城市”的建设显得至关重要，其建设重点在于雨水入渗、滞留、市政道路绿化、城市绿地与广场等方面，使排水管网和“海绵城市”相辅相成，通过排水管网泄水、自然渗水、自然蓄水等综合手段共同缓解城市内涝问题。

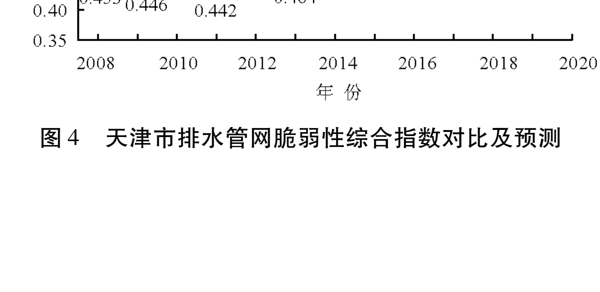

图 4　天津市排水管网脆弱性综合指数对比及预测

5 结 论

研究主要对天津市城市排水管网发展现状进行“诊断”及预测,并得出如下结论:

(1)2008 – 2017 年,天津市城市排水管网变权评价结果总体呈上升趋势,但其中存有波动。在暴露度方面,“海绵城市”建设集中于透水地面率与绿化覆盖率两方面;在敏感性方面,对老旧城区城市排水管网进行深度改造与扩建,持续降低排水管网自身的敏感性;在适应能力方面,重点对投入资金进行监管,提高利用效率,完善城市排水管网配套设施。

(2)2018 – 2020 年,天津市城市排水管网脆弱性综合指数稳步发展并稳定在“轻度”区间,但“海绵城市”建设仍有巨大的发展空间。因此,更进一步地深化“海绵城市”与城市排水管网的功能融合对缓解城市内涝灾害仍具有重要的研究价值。

(3)研究表明惩罚型变权综合评价模型具有较高的科学性与客观性,但该模型中参数的选择与否定水平的确定对评价结果的准确性至关重要。因此,如何选择与确定更为合理的参数值与否定水平需要更加深入地研究。

参考文献:

[1] 卢文刚. 城市内涝灾害管理的问题及对策:以广州市为例[J]. 中国行政管理,2014(1):106 – 108.

[2] 吴丹洁,詹圣泽,李友华,等. 中国特色海绵城市的新兴趋势与实践研究[J]. 中国软科学,2016(1):79 – 97.

[3] 程 钰,任建兰,徐成龙. 资源衰退型城市人地系统脆弱性评估——以山东枣庄市为例[J]. 经济地理,2015,35(3):87 – 93.

[4] SALAS J, YEPES V. Urban vulnerability assessment: advances from the strategic planning outlook [J]. Journal of Cleaner Production,2018,179:554 – 558.

[5] DUMITRAŞCU M, MOCANU I, MITRICĂB, et al. The assessment of socio – economic vulnerability to drought in Southern Romania (Oltenia Plain)[J]. International journal of disaster risk reduction,2018,27:142 – 154.

[6] 袁海红,牛方曲,高晓路. 城市经济脆弱性模拟评估系统的构建及其应用[J]. 地理学报,2015,70(2):271 – 282.

[7] LI He, JING Shen, YANG Zhang. Ecological vulnerability assessment for ecological conservation and environmental management [J]. Journal of Environmental Management, 2018,206:1115 – 1125.

[8] 徐 君,李贵芳,王育红. 国内外资源型城市脆弱性研究综述与展望[J]. 资源科学,2015,37(6):1266 – 1278.

[9] HUFSCHMIDT G. A comparative analysis of several vulnerability concepts [J]. Natural Hazards,2011,58(2):621 – 643.

[10] MCCARTHY J J, CANZIANI O F, LEARY N A, et al. IPCC climate change 2001: impacts, adaptation, and vulnerability [M]. Contribution of Working Group II to the Third Assessment Report. Cambridge University Press, 2001:81 – 111.

[11] CHI Yuan, SHI Honghua, WANG Yuanyuan, et al. Evaluation on island ecological vulnerability and its spatial heterogeneity [J]. Marine Pollution Bulletin, 2017, 125 (1 – 2):216 – 241.

[12] CHANG Lifang, HUANG Shuli. Assessing urban flooding vulnerability with an energy approach [J]. Landscape & Urban Planning,2015,143:11 – 24.

[13] 方创琳,王 岩. 中国城市脆弱性的综合测度与空间分异特征[J]. 地理学报,2015,70(2):234 – 247.

[14] 杨文健,李晓明. 长江经济带城市综合脆弱性影响因素及其测度——以长江经济带的 36 个城市为例[J]. 城市问题,2017(1):19 – 28.

[15] RAUFIRAD V, HUNTER R, ENDRESS B A, et al. Application of vulnerability assessment to a grazed rangeland: toward an integrated conceptual framework [J]. Rangelands,2018,40(1):17 – 23.

[16] 龚艳冰,戴靓靓,杨舒馨. 云南省农业旱灾社会脆弱性评价研究[J]. 水资源与水工程学报,2017,28(6):239 – 243.

[17] 安士伟,万三敏,李小建. 城市脆弱性的评估与风险控制——以河南省为例[J]. 经济地理,2017,37(5):81 – 86.

[18] 潘争伟,周戎星,王艳华. 区域水资源系统脆弱性评价的集对分析与可变模糊集方法[J]. 中国人口·资源与环境,2016,26(S2):198 – 202.

[19] 李 博,杨 智,苏 飞. 基于集对分析的大连市人海经济系统脆弱性测度[J]. 地理研究,2015,34(5):967 – 976.

[20] 彭 飞,韩增林,杨 俊,等. 基于 BP 神经网络的中国沿海地区海洋经济系统脆弱性时空分异研究[J]. 资源科学,2015,37(12):2441 – 2450.

[21] 杨新军,张 慧,王子侨. 基于情景分析的西北农村社会 – 生态系统脆弱性研究——以榆中县中连川乡为例[J]. 地理科学,2015,35(8):952 – 959.

[22] 李彤玥. 基于“暴露 – 敏感 – 适应”的城市脆弱性空间研究——以兰州市为例[J]. 经济地理,2017,37(3):86 – 95.

[23] 张路路,郑新奇,张春晓,等. 基于变权模型的唐山城市脆弱性演变预警分析[J]. 自然资源学报,2016,31(11):1858 – 1870.

[24] LI Hongmin, WANG Jianzhou, LU Haiyan, et al. Research

and application of a combined model based on variable weight for short term wind speed forecasting [J]. Renewable Energy,2018,116:669 - 684.

[25] WU Qiang,LI Bo,CHEN Yulong. Vulnerability assessment of groundwater inrush from underlying aquifers based on variable weight model and its application [J]. Water Resources Management,2016,30(10):3331 - 3345.

[26] WU Qiang,ZHAO Dekang,WANG Yang,et al. Method for assessing coal-floor water - inrush risk based on the variable - weight model and unascertained measure theory [J]. Hydrogeology Journal,2017,25(10):1 - 15.

[27] 付 博,姜琦刚,任春颖. 扎龙湿地生态脆弱性评价与分析[J]. 干旱区资源与环境,2011,25(1):49 - 52.

[28] 孙平军,修春亮,王忠芝. 基于 PSE 模型的矿业城市生态脆弱性的变化研究——以辽宁阜新为例[J]. 经济地理,2010,30(8):1354 - 1359.

[29] 李永化,范 强,王 雪,等. 基于 SRP 模型的自然灾害多发区生态脆弱性时空分异研究——以辽宁省朝阳县为例[J]. 地理科学,2015,35(11):1452 - 1459.

[30] 胡雅杰,董 阳,郭 映,等. 环江流域径流模拟研究[J]. 资源科学,2014,36(10):2038 - 2045.

[31] IPCC. Climate change:the IPCC second assessment report [N]. Cambridge University Press,1996:330 - 355.

[32] POLSKY C,NEFF R,YARNAL B. Building comparable global change vulnerability assessments:the vulnerability scoping diagram [J]. Global Environmental Change,2007,17(3 - 4):472 - 485.

[33] SCHAUSER I,SCHNEIDERBAUER S,HARVEY A,et al. Urban regions:vulnerabilities,vulnerability assessments by indicators and adaptation options for climate change impacts,december [EB/OL]. [2018 - 5 - 20]. http://www. mcrit. com/ADJUNTS/ciutats_sostenibles/UE_paper. pdf.

[34] SWART R,FONS J,GEERTSEMA W,et al. Urban vulnerability indicators a joint report of ETC - CCA and ETC - SIA[J]. Social Indicators Research, 2012,13(6):201 - 227.

[35] 陈 佳,杨新军,尹 莎,等. 基于 VSD 框架的半干旱地区社会——生态系统脆弱性演化与模拟[J]. 地理学报,2016,71(7):1172 - 1188.

[36] 王思思,于 迪,车 伍. 国际城市暴雨内涝脆弱性评估和适应性对策研究[J]. 城市发展研究,2015,22(7):23 - 26.

[37] 吴冠岑,牛 星. 土地生态安全预警的惩罚型变权评价模型及应用——以淮安市为例[J]. 资源科学,2010,32(5):992 - 999.

[38] 李德清,李洪兴. 状态变权向量的性质与构造[J]. 北京师范大学学报(自然科学版),2002(4):455 - 461.

[39] SONG D,KEITH W H,DANG Y. Forecasting China's electricity consumption using a new grey prediction model [J]. Energy,2018,149:314 - 328.

[40] XU Ning,DANG Yaoguo,GONG Yande. Novel grey prediction model with nonlinear optimized time response method for forecasting of electricity consumption in China [J]. Energy,2017,118:473 - 380.

[41] 韦 师. 基于灰色预测模型的我国就业发展趋势分析 [J]. 统计与决策,2018,34(4):109 - 111.