

文章编号: 1004- 4574(2011) 02- 0029- 07

# 基于 GIS 的上海浦东暴雨内涝灾害脆弱性研究

尹占娥<sup>1</sup>, 暴雨杰<sup>1</sup>, 殷 杰<sup>2</sup>

(1. 上海师范大学 地理系, 上海 200234  
2. 华东师范大学 地理信息科学教育部重点实验室, 上海 200062)

**摘 要:** 随着全球气候变化和城市化进程的加速发展, 城市暴雨洪涝灾害的频度和强度不断加强。灾害脆弱性研究是当前灾害研究的热点, 基于灾损率的脆弱性分析方法是当前灾害脆弱性研究的重要课题点与前沿。采用 GIS 和遥感技术, 依据 20 年、50 年、100 年、200 年、500 年、1000 年一遇的 6 个重现期情景, 对上海浦东新区开展了基于灾损曲线的脆弱性研究。研究中修正了上海地区的径流模型, 基于 GIS 栅格编制了不同重现期的淹没深度图, 实地调查了研究区暴雨内涝灾害的灾损率数据, 确定了研究区的脆弱性等级划分, 并利用 GIS 编制了基于不同重现期情景的上海浦东脆弱性图。研究中提出的方法对于沿海城市开展暴雨内涝等自然灾害脆弱性研究具有借鉴意义, 研究结果可供区域灾害风险评估和防灾减灾规划参考。

**关键词:** 上海; 暴雨内涝灾害; 脆弱性; 情景

中图分类号: TP391; P426.616 文献标志码: A

## GIS-based study on vulnerability to rainstorm inundation in Pudong of Shanghai

YIN Zhan-e<sup>1</sup> BAO Lijie<sup>1</sup> YIN Jie<sup>2</sup>

(1. Shanghai Normal University, Shanghai 200234, China 2. East China Normal University, Shanghai 200062, China)

**Abstract** With global climate change and rapid urbanization process, rainstorm flood disaster has become a major issues and severe challenges faced by human society and economic development. Vulnerability assessment is important basic content of risk assessment which is a hot points research of international disaster prevention and mitigation. The authors utilized a revised SCS model to calculate heavy rain runoff by DEM and the depth of flood inundation for different return periods. Based on six return periods of 20, 50, 100, 200, 500 and 1000 years, we select Pudong New Area as case study and apply GIS and remote sensing technology to carry out hazards analysis and vulnerability analysis in this paper. Base on the grid, we re-classify and draw up the inundation depth maps for different return periods. The data on disaster loss rate of rainstorm inundation in study area was surveyed and the vulnerability classification for study area was carried out. The obtained results give a reference to assessment of regional disaster and planning of disaster prevention and reduction.

**Key words** Shanghai; rainstorm; waterlogging; vulnerability; scenario

在全球变暖、海平面上升、快速城市化的背景下, 自然灾害发生的强度、频度和广度不断增加, 洪涝灾害是目前全球各类灾害中造成损失最大的灾害且在波动中仍趋于上升趋势。脆弱性分析是风险评估的重要方法和手段, 已成为当前国际灾害研究的热点领域<sup>[1-3]</sup>。脆弱性是指承灾体受到自然灾害外力作用下损坏的

收稿日期: 2009- 11- 16 修回日期: 2010- 10- 15

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41071324, 40730526); 上海市教委重点学科项目 (J50402); 上海师范大学重点培育学科项目 (DZL801)

作者简介: 尹占娥 (1963- ), 女, 副教授, 主要从事遥感、GIS 和城市灾害等研究. E-mail: Zhanyeyin@126.com

程度,又称为易损性。评估承灾体脆弱性大小的方法主要有 3 种:即,基于历史灾情数据判断脆弱性方法、基于指标体系方法评估脆弱性,以及基于灾损率和灾损曲线的方法。基于历史灾情数据和基于指标体系方法评估脆弱性,虽然简单易操作,但评估规范性缺乏和精度不确定性,使得评估结果可信度不高。灾损曲线是通过实地调查对承灾个体受到不同强度自然灾害作用后的损失大小关系曲线。该方法由于数据采集规范客观,评估结果的精度和可信度高,被很多学者所采用。我国基于灾损率调查进行的自然灾害脆弱性研究案例,特别是针对城市暴雨内涝灾害的灾损率调查与研究还很薄弱。上海浦东新区地处东海之滨,其暴雨内涝灾害具有频发性和典型性,因此本文以上海浦东新区为研究对象,利用 GIS 技术,开展了灾损率实地调查,确定了研究区不同用地类型的灾损率,基于 GIS 制图表达不同情景的上海浦东暴雨内涝灾害脆弱性,研究了该地区不同用地类型暴雨内涝灾害的脆弱性时空分布。该项研究充实了我国城市自然灾害实证研究案例,研究方法对于我国沿海城市开展自然灾害脆弱性研究具有借鉴意义。同时,研究中确定的灾损率和所编制的脆弱性分布图,为政府的防灾减灾及城市的可持续发展提供依据。

## 1 研究区与数据

上海浦东新区地处北亚热带南缘东亚季风盛行的滨海地带,海洋性气候降水充沛,年平均降水量约为 1100mm,且降水多集中在 5-9 月的汛期,由于热带风暴、局部地区雷暴和特殊天气变化常造成暴雨。1959-1985 年的 27a 中,有暴雨 76 次。加之地形平坦,地势东南高,西北低,地面高程仅 3.5~4.5m,每逢特大暴雨常因不及排泄而造成水患。2008 年 9 月 20 日,下午 2 时 15 分至 3 时 15 分之间 1h 内降雨量高达 108mm,超过上海百年一遇的暴雨标准(101mm/h),造成 1 人死亡,14 人受伤,20 多条段道路积水,60 余户民居进水。

研究所需数据主要有:(1)2005 年上海市航空遥感像片解译的土地利用数据;(2)DEM 数据;(3)暴雨内涝灾害损失数据,主要根据实地调查获得;(4)上海浦东统计年鉴和浦东年鉴。

## 2 研究方法与结果

暴雨内涝灾害脆弱性分析是通过致灾因子分析研究区淹没深度与范围的基础上进行的。其中确定淹没深度与范围,需要应用气象的降雨模型和水文径流模型,构建研究区的 DEM 的基础上进行。本文脆弱性分析是依据实地调查的不同用地类型灾损数据基础上,确定脆弱性等级,基于 GIS 制图表达研究区脆弱性分布图。具体研究方法如下。

### 2.1 致灾因子分析

致灾因子分析通过对不同重现期暴雨内涝过程的情景模拟,基于 GIS 制图表达研究区暴雨内涝淹没的范围与深度。本文在参考已有的城市内涝模型的基础上<sup>[4-9]</sup>,应用降雨模型、径流模型、暴雨内涝情景模型,基于研究区 DEM 和 GIS 依据 20a 50a 100a 200a 500a 1000a 一遇的 6 种重现期情景,模拟了研究区各情景的暴雨内涝淹没范围与深度,并制图表达了 6 种情景的淹没图。

#### 2.1.1 降雨模型

降雨是内涝灾害的致灾源,降雨量是评估模型中的主要驱动变量。城市降雨模型利用上海市暴雨强度公式,计算出降雨过程中任意时间段内的平均降雨强度,模拟降雨在时间上的变化特征。本文选取的研究区域较小且地理环境特征较为一致,因此可以假设降雨在空间分布上是均匀的。依据研究区暴雨强度公式,按不同历时计算不同重现期内的暴雨强度,并计算出研究区集水区域内的平均降雨量。为了统一量纲(暴雨强度单位为 mm/h),对降雨强度公式进行修正后,其表达式为

$$q = 1995.84(P^{0.30} - 0.42)/(t + 10 + 7 \lg P)^{0.82 + 0.07 \lg P} \quad (1)$$

式中:  $P$  表示暴雨重现期;  $q$  表示暴雨强度;  $t$  表示降雨历时

#### 2.1.2 径流模型

暴雨径流过程中,城市排水能力、地表下渗、不平整产生的植被截留、蒸散发、滇注等是径流主要的损失量。因土壤类型和下垫面下渗特性的不同,下渗率的变化幅度很大,对地面径流过程起到决定性的作用。相对而言,其它因素对径流的产生过程影响较小。由于上海浦东新区的下垫面条件与美国不同且气候特征表

现为降雨的季节变化很大, 有集中性大暴雨, 下渗量较少, 直接采用美国水土保持局提出的径流计算方法 (SCS 模型)<sup>[10-11]</sup>, 导致计算出的径流量偏小。因此, 本文借鉴了贺宝根等依据实测资料对上海城市地区流域饱和储水量经验系数 (为 0.05S) 和径流曲线数值 (CN) 的测算方法<sup>[12]</sup>, 将研究区的绿化率看作透水面积比率, 从而计算出 S 的值为 31.4mm, CN 值为 89。城市径流模型的表达式为:

$$Q = (P - 0.05S)^2 / (P + 0.95S) \quad (2)$$

式中,  $Q$  表示径流量;  $P$  表示降雨量;  $S$  表示饱和储水量

在暴雨径流过程中, 城市的排水能力对径流量的损失是很大的。目前, 除陆家嘴金融区、机场以及部分重点防护区域以外, 浦东新区其它区域的室外排水标准是按照 1a 一遇 (36mm/h) 的降雨强度设计的, 由于排水管网数据无法获取, 研究中假设集水区内的排水管网空间分布和排水能力是一致的。因此, 本文确定研究区暴雨内涝积水量计算公式为

$$W = (Q - V) \times S \quad (3)$$

式中:  $W$  表示内涝积水量;  $Q$  表示径流量;  $V$  表示排水量 (36mm/h);  $S$  表示集水区面积。

### 2.1.3 研究区 DEM 模型

城市地形模型是模拟城市地表高程的变化。本文利用 2005 年上海地形等高线图, 构建了研究区地面高程 DEM, 其中点数据的高程精度为 0.1m, 通过插值得到精度可为 0.01m, 此高程数据精度能够满足该项研究的需要。城市地表上林立着大量的房屋建筑, 这些建筑对整个地表高程变化有很大影响。同时, 城市建筑对地表水的径流过程也起了很大的阻挡作用, 影响了水流在城市地表上的分布和内涝积水的深度。但研究中由于城市建筑高程二值栅格数据缺乏, 因此本项研究中采用地面高程 DEM 代替城市地形模型。

### 2.1.4 暴雨内涝情景模拟

本项研究中的情景模拟假设城市暴雨积水处于相对静止状态, 不考虑地面径流的流速等。城市的暴雨降水往往集中在前 1~2 个 h 内, 且气象和市政工程的暴雨计算标准也多参考 1h 降雨量。研究采用 20a ( $T_1$ ), 50a ( $T_2$ ), 100a ( $T_3$ ), 200a ( $T_4$ ), 500a ( $T_5$ ), 1 000 ( $T_6$ ) a 一遇 6 个重现期情景, 其暴雨强度分别为: 77mm/h, 91mm/h, 101mm/h, 113.5mm/h, 129.6mm/h, 144mm/h (表 1); 依据上海地区的实测数据修正了上海地区的径流模型, 得出浦东新区 6 个重现期的降雨径流量分别为 53.26mm, 66.19mm, 75.57mm, 87.41mm, 102.81mm, 116.70mm (表 1); 地表径流量考虑了浦东新区排水标准 36mm/h (按 2020 年规划), 得到 6 个重现期浦东地表的径流量依次为: 17.26mm, 30.19mm, 39.57mm, 51.41mm, 66.81mm, 80.70mm。计算得出不同情景集水区的总积水量, 采用基于 GIS 的“等体积法”模拟内涝淹没区域和淹没深度<sup>[13-15]</sup>。将暴雨内涝看作一种无源淹没状态, 所有低洼处都可能积水成灾, 凡是高程低于水位值的点都作为淹没区, 研究采用 GIS 栅格法, 研究单元为 100m × 100m。基于 ArcGIS 计算出集水区不同重现期 1h 降雨的水量、淹没高程和淹没区域面积 (见表 1)。

表 1 不同重现期淹没深度和淹没面积

Table 1 Inundated depth and area for different return periods

	重现期 /a					
	$T_1$	$T_2$	$T_3$	$T_4$	$T_5$	$T_6$
暴雨强度 / (mm · h <sup>-1</sup> )	77	91	101	113.5	129.6	144
径流量 / (mm · h <sup>-1</sup> )	53.3	66.2	75.6	87.4	102.8	116.7
总积水量 / 10万 m <sup>3</sup>	98.2	171.8	225.2	292.5	380.2	459.2
淹没高程 /m	3.78	3.91	3.98	4.02	4.06	4.09
淹没面积 /km <sup>2</sup>	44.5	55.0	62.69	231.7	266.4	285.6
最大淹没深度 /m	0.3	0.5	1	1.5	2	2.5

淹没高程叠加区域 DEM 进行分析后, 以 100 × 100m 栅格, 将研究区淹没高程与地形高程相减, 得到淹没深度, 其中小于 0 的值为未淹没地区, 大于 0 的值为淹没地区。为研究方便将淹没深度分为 5 个等级: ≤ 0m, 0~0.5m, 0.5~1m, 1~1.5m, 1.5~2.5m, 基于 ArcGIS 编制淹没深度图 (图 1)。主要研究结果:

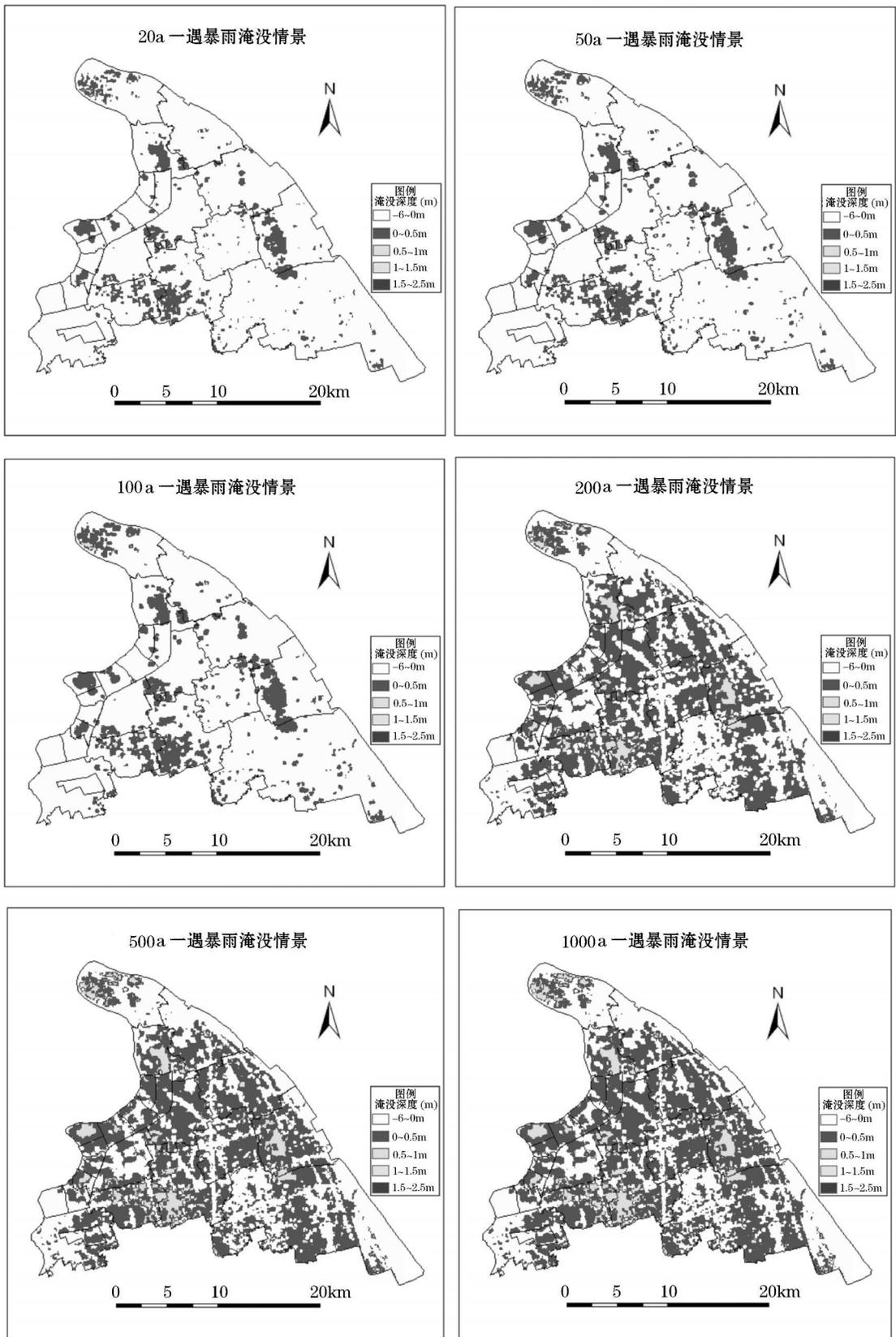


图 1 不同重现期暴雨淹没深度图

Fig 1 Depth maps of inundation of rainstorm with different return periods

(1) 淹没面积和深度随着暴雨重现期增长而快速增大, 其中 200a 一遇是淹没情景的转折点, 其中 20, 50, 100a 一遇淹没范围深度主要是 0~ 0.5m, 200, 500 和 1000a 一遇淹没范围深度主要在 0~ 1m, 而且淹没面积也快速增加。说明上海浦东对于 200a 一遇以下的暴雨内涝灾害是可以应对的, 而对于 200a 一遇以上

的暴雨内涝灾害是很脆弱的, 需要制定更加高的应对方式。

(2) 从浦东土地利用类型看, 铁路对于 200a 一遇以下的暴雨内涝灾害是安全的, 不会淹没, 200 年一遇及以上的暴雨才会被淹没。各种情景下居住用地和工业用地被淹没的范围是相对较低的。

(3) 从淹没面积看, 各种情景下农田是淹没面积最大的类型, 淹没面积增长较快的用地类型是农田、滩涂、仓储用地、绿地等;

## 2.2 脆弱性分析

本文脆弱性分析的基本方法是通过实地调查灾损数据, 确定不同土地利用类型灾损率, 建立了不同土地利用类型的损失率和淹没深度之间的关系。考虑到内涝灾害不同于洪水, 其灾害强度较低、持续时间也较短, 且在实际的调查中由于水流速度等造成的破坏和损失几乎没有, 所以本文只建立了损失率和淹没深度之间的关系。在借鉴国内外脆弱性研究成果的基础上<sup>[16-21]</sup>, 通过实地调研与灾害损失资料数据的收集, 研究确定了上海浦东新区 4 种用地类型灾损率 (见表 2)。

表 2 上海浦东各用地类型的灾损率

Table 2 Loss ratio of lands with different usage in Pudong of Shanghai

土地利用类型	洪涝灾害灾损率			
	0~ 50cm	50~ 100cm	100~ 150cm	150~ 250cm
住宅用地	0.33	0.53	0.80	0.90
农业用地	0.55	0.70	0.80	0.95
工业仓储用地	0.20	0.40	0.60	0.85
公共管理与商服用地	0.25	0.45	0.60	0.80

各种用地类型灾损率取平均值, 淹没 0~ 50cm 的灾损率为 0.33; 淹没 50~ 100cm 的灾损率为 0.52; 灾损率在 0.52 以上为高脆弱区。因此, 将浦东新区 4 种用地类型在不同重现期的洪涝灾害脆弱性划分为 3 个等级: 低脆弱区: 灾损率小于 0.33; 中脆弱区: 灾损率为 0.33~ 0.52; 高脆弱区: 灾损率大于 0.52。基于 GIS 得到浦东新区 6 个重现期的暴雨洪涝灾害脆弱性分布图 (图 2)。

从图中分析得出, 上海浦东新区各种暴雨重现期情景下, 高脆弱区的用地类型主要是农田, 中脆弱区主要是自然村落和住宅, 低脆弱区主要是工业仓储和公共用地。

## 3 结语

本文基于 GIS 以 6 个重现期为情景, 分析了城市暴雨洪涝灾害脆弱性及制图表达方法, 并以上海浦东新区为例, 分析了不同土地利用类型 6 个重现期的暴雨内涝灾害脆弱性。研究采用 20a、50a、100a、200a、500a、1000a 一遇 6 个重现期情景, 采用上海暴雨强度公式, 依据上海地区的实测数据修正了上海地区的径流模型, 获得浦东新区 6 个重现期的降雨径流量。考虑了浦东新区排水标准 36mm/h (按 2020 年规划), 得到 6 个重现期浦东地表暴雨内涝积水淹没深度和范围。通过浦东防汛指挥部的调研和浦东年鉴 1998-2008 的灾害资料统计分析, 开展了不同用地类型的灾损率实地问卷调查的方法, 解决了暴雨内涝灾害损失数据缺乏的问题。基于 GIS 建立了浦东高精度地面高程 DEM, 结合浦东新区 6 个重现期径流量和淹没深度, 利用 ARCGIS 软件, 编制了浦东不同重现期情景下基于 GIS 栅格的淹没范围和淹没深度图, 基于实地调查的灾损率数据, 编制不同重现期浦东 4 种用地类型的脆弱性等级分布图, 形成了基于 GIS 的暴雨内涝灾害脆弱性分析与制图方法体系, 这对于我国城市开展暴雨内涝等自然灾害脆弱性研究具有借鉴意义。

研究中得到几点体会, 第一我国对于暴雨内涝灾害的灾损数据非常缺乏, 因此, 需要政府、保险等部门与科研单位结合起来, 构建规范统一的灾害损失数据库, 这对于提高我国自然灾害研究水平至关重要。其次对于房屋建筑影响地表高程的变化和对水体流动的阻挡作用, 不同用地类型地表下渗等应考虑到地表径流模型中, 这样情景模拟研究结果才会更加准确和实用。

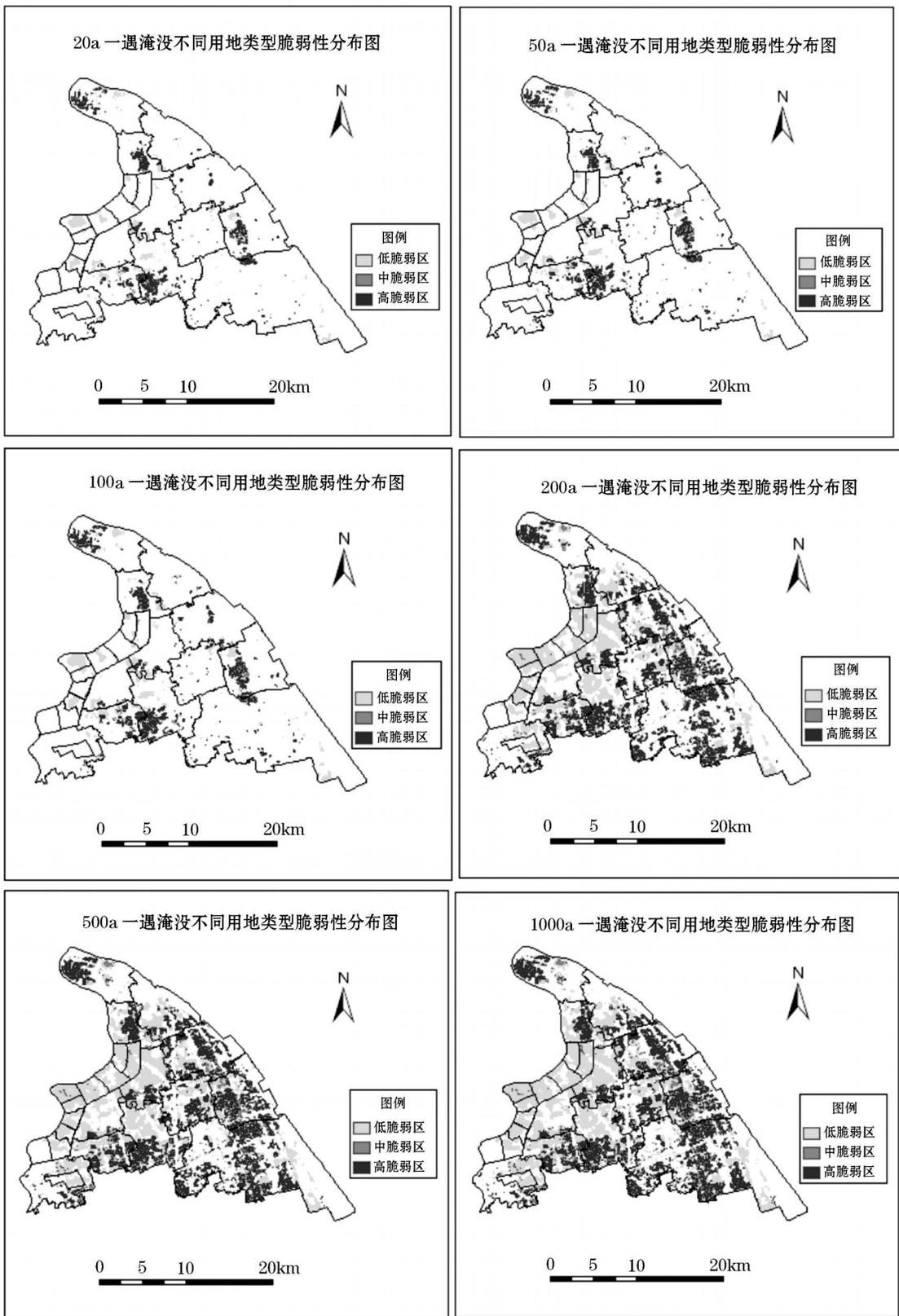


图 2 不同重现期暴雨洪涝灾害脆弱性分布图

Fig. 2 Flood vulnerability distribution of rainstorm with different return periods

参考文献:

[ 1 ] 尹占娥,许世远,殷杰,等.基于小尺度的城市暴雨内涝情景模拟与风险评估[J].地理学报,2010 65(5): 553-562.

[ 2 ] Shi P J Du J Ji M X. Urban Risk Assessment Research of Major Natural Disasters in China[J]. Advances in Earth Science 2006 21(2): 170-177

- [ 3 ] 周乃晟, 袁雯. 上海市暴雨地面积水的研究 [ J ]. 地理学报, 1993, 48( 3 ): 262- 271.
- [ 4 ] 王林, 秦其明, 李吉芝, 等. 基于 GIS 的城市内涝灾害分析模型研究 [ J ]. 测绘科学, 2004, 29( 3 ): 48- 51.
- [ 5 ] 赵思健, 陈志远, 熊利亚. 利用空间分析建立简化的城市内涝模型 [ J ]. 自然灾害学报, 2004, 13( 6 ): 8- 14.
- [ 6 ] Su M D, Kang J L, Chang L F, et al. A Grid- based GIS Approach to Regional Flood Damage Assessment [ J ]. Journal of Marine Science and Technology, 2005, 13( 3 ): 184- 192.
- [ 7 ] Jonkman S N, Bockarjova M, Kok M, et al. Integrated hydrodynamic and economic modelling of flood damage in the Netherlands [ J ]. Ecological Economics, 2008, 66: 77- 90.
- [ 8 ] Dutta D, Herath S, Musiak K. A Mathematical Model for Flood Loss Estimation [ J ]. J Hydro, 2003, 277: 24- 49.
- [ 9 ] 殷杰, 尹占娥, 王军, 等. 基于 GIS 的城市社区暴雨内涝灾害风险评估 [ J ]. 地理与地理信息科学, 2009, 25( 6 ): 16- 19.
- [ 10 ] McCuen R H. A Guide to Hydrologic Analysis Using SCS Method [ M ]. Prentice- Hall Inc: Englewood Cliffs, 1982, 67- 97.
- [ 11 ] Novotny V, Chesters G, Shannon J H. Handbook of Nonpoint Pollution Source and Management [ M ]. New York: Van Nostrand Reinhold Company, 1981, 81- 103.
- [ 12 ] 贺宝根, 陈春根, 周乃晟. 城市化地区径流系数及其应用 [ J ]. 上海环境科学, 2003, 22( 7 ): 472- 475.
- [ 13 ] 张犁. 城市洪水分析与模拟的 GIS 方法研究 [ J ]. 地理学报, 1995, 50( 增刊 ): 76- 84.
- [ 14 ] 刘仁义, 刘南. 基于 GIS 的复杂地形洪水淹没区计算方法 [ J ]. 地理学报, 2001, 56( 1 ): 1- 6.
- [ 15 ] 郭利华, 龙毅. 基于 DEM 的洪水淹没分析 [ J ]. 测绘通报, 2002, 11: 25- 30.
- [ 16 ] Amell N W. Expected Annual Damage and Uncertainties in Flood Frequency Estimation [ J ]. J Water Res PIM anagement, 1999, 115: 94- 107.
- [ 17 ] Beming C, Viljoen M F, DuPlessis L A. Loss Function for Sugar- cane Depth and Duration of Inundation as Determinates of Extent of Flood Damage [ J ]. Water SA, 2000, 26( 4 ): 527- 530.
- [ 18 ] Beming C, DuPlessis L A, Viljoen M F. Loss Function for Structural Flood Mitigation Measures [ J ]. Water SA, 2001, 27( 1 ): 35- 38.
- [ 19 ] Boyle S J, Tsimis I K, Kanaroglu P S. Developing Geographic Information Systems for Land Use Impact Assessment in Flooding Conditions [ J ]. J Water Res P, 1998, 124( 2 ): 89- 98.
- [ 20 ] Gokhan D. Estimating Expected Annual Damage for Levee Retrofits [ J ]. J Water Res P, 1997, 123( 2 ): 89- 94.
- [ 21 ] Elena Badilla Cota. Flood hazard, vulnerability and risk assessment in the city of Turrialba, Costa Rica [ J ]. International Institute for Geo- Information Science and Earth Observation ( ITC ), 2002, 1- 102.