

# 近20年无锡市城区洪涝灾害风险评估研究

司芸浩,马瑞欣,孙 源,潘劲松,刘嘉梁,宋璐宏

(无锡学院 大气与遥感学院,江苏 无锡 214105)

**摘要:**基于灾害评估法和 ArcGIS 空间处理法等,针对区域洪涝灾害风险动态评估、风险趋势预测等方面,从致灾因子危险性、孕灾因子敏感性、承灾因子易损性、抗灾因子安全性4个方面,对2000—2020年无锡市城区进行暴雨洪涝风险评估研究。通过分析区域暴雨洪涝灾害分布与表现形式,有助于开展防洪减灾工作,从而降低暴雨洪涝损失。

**关键词:**防洪排涝;风险评估;无锡市

中图分类号:TV122

文献标识码:B

文章编号:1007-7839(2024)04-0062-0004

## Study on the risk assessment of flood disaster in urban area of Wuxi City in recent 20 years

SI Yunhao, MA Ruixin, SUN Yuan, PAN Jinsong, LIU Jialiang, SONG Luhong

(School of Atmospheric Engineering and Remote Sensing, Wuxi University, Wuxi 214105, China)

**Abstract:** In terms of dynamic assessment and risk trend prediction of regional flood disaster risk, based on the disaster assessment method and ArcGIS spatial processing method, the risk assessment of rainstorm and flood in the urban area of Wuxi City from 2000 to 2020 is studied from four aspects: hazard of disaster causing factors, sensitivity of disaster pregnant factors, vulnerability of disaster bearing factors, and safety of disaster resistant factors. By analyzing the distribution and manifestation of regional rainstorm and flood disaster, it is helpful to carry out flood control and disaster reduction work, thus reducing the loss of rainstorm and flood.

**Key words:** flood control and drainage; risk assessment; Wuxi City

城市洪涝灾害是指城市范围内因降水量过大、上游洪水侵袭、河湖排水能力不足、江河洪水或潮水顶托导致的地表积水及其引发的次生灾害的统称,其中暴雨洪涝造成的影响尤为明显<sup>[1-3]</sup>。无锡市境内河道众多,地势低洼,加之梅雨天气的影响,城区极易形成内涝,受多重因素影响,洪水水位重现期明显缩短,因此有必要对城区进行洪涝风险评估与区划研究<sup>[4]</sup>。本文利用多源遥感数据对无锡市城区进行暴雨气象灾害风险动态评估,旨在为无锡市

城区洪涝灾害防御规划提供依据,同时为气象监测、预报预警等提供参考。

## 1 研究方法

### 1.1 研究数据

本文所用资料为2000—2020年无锡市范围内经过质量控制的地面观测站点日降水资料,即在当天8点测得的降水量为前一天累计降水量。从地理空间数据云网站中搜索无锡市城区的位置,并选择

收稿日期:2024-01-30

**基金项目:**江苏省高等学校基础科学(自然科学)研究面上项目(22KJB170021);2021江苏省双创博士项目(JSSCBS20210862);无锡学院人才启动资金项目(2021r020);江苏省大学生创业创新训练项目(202213982051Z)

**作者简介:**司芸浩(2003—),男,本科,主要从事城市灾害遥感研究。E-mail: 3401816947@qq.com

30 m 分辨率 DEM 数据进行下载。CLCD 土地利用类型数据从中国逐年土地覆盖数据获取,借助全国地理信息资源目录服务获取行政区划数据,社会经济数据与土地面积来源于中经数据网。

## 1.2 研究思路

收集整理无锡市辖区内各项研究数据,包括无锡市 5 个市辖区的常住人口数量、市辖区 GDP、总土地面积、林地面积、水域面积与耕地面积,在归纳数据的基础上,根据《暴雨洪涝灾害风险区划技术规范》要求,应用 GIS 空间处理法与加权综合的方法建立暴雨洪涝灾害风险评估的计算公式,得到暴雨洪涝灾害风险评估相关指标。

## 1.3 计算方法

本研究采用暴雨洪涝灾害风险评估指数计算方法、归一化计算法、加权综合评价法、ArcGIS 空间处理法,对无锡市各市辖区进行暴雨洪涝灾害风险评估分析。

### 1.3.1 暴雨洪涝灾害风险评估指数计算方法

#### 1.3.1.1 暴雨洪涝灾害风险因子计算

在计算致灾因子危险性时,通常采用暴雨强度与暴雨频次计算(式 1)。致灾因子取 2000—2020 年无锡市气象站地面观测数据中 2000 年、2005 年、2010 年、2015 年、2020 年的暴雨强度和频次。其中日雨量  $\geq 50$  mm 的天数记作暴雨频次并进行数据归一化处理。

当日雨量  $\geq 50$  mm 时,将当日计为暴雨起算日。设自暴雨起算 3 d 的最大总降水量为暴雨强度并进行处理,按照暴雨强度样本资料总量大小汇总排序,得到不同等级对应的降水强度阈值,划出各级降水强度范围<sup>[5]</sup>。受气象因素影响,暴雨强度和频次与暴雨洪涝灾害的损失影响呈正相关关系。

致灾因子危险性指标计算式为

$$x_1 = 0.63R_1' + 0.37R_2' \quad (1)$$

式中: $x_1$ 为致灾因子危险性指标; $R_1$ 为暴雨频次, $R_1$ 归一化后为  $R_1'$ ;  $R_2$ 为暴雨强度, $R_2$ 归一化后为  $R_2'$ 。

在计算孕灾因子敏感性时,通常用高程坡度与河流面积分布来计算<sup>[6]</sup>。区域内地形起伏的高度差、河流水系分布是孕灾因子敏感性考虑的主要因素,对于在同等强度的灾害环境下,敏感性越高,灾害发生的风险越大,所造成的损失就越大。暴雨侵袭时,高度差较大的地区容易发生内涝,该地区发生洪涝灾害的频率固然增加。由于无锡市地形总体平坦开阔,河流水系分布广的地区易发生河水倒灌现象,因此本文选用高程坡度与河流面积分

布进行计算,高程坡度的指标为 0.67,河流面积的指标为 0.33。

孕灾因子敏感性指标计算式为

$$x_2 = 0.67R_3' + 0.33R_4' \quad (2)$$

式中: $x_2$ 为孕灾因子敏感性指标; $R_3$ 为高程坡度, $R_3$ 归一化后为  $R_3'$ ;  $R_4$ 为河流面积, $R_4$ 归一化后为  $R_4'$ 。

除考虑农业经济因素外,洪水灾害危险程度区划还要考虑 GDP 的影响<sup>[7]</sup>,承灾因子易损性采用耕地面积、人口指标和国内生产总值来计算。其中,人口指标  $R_5$  占 65%、国内生产总值指标  $R_6$  占 27%,耕地面积指标  $R_7$  占 12%,即权重分别为 0.61、0.27 和 0.12。

承灾因子易损性指标计算式为

$$x_3 = 0.61R_5' + 0.27R_6' + 0.12R_7' \quad (3)$$

式中: $x_3$ 为承灾因子易损性指标;人口指标为  $R_5$ ,  $R_5$  归一化后为  $R_5'$ ;  $R_6$  为国内生产总值, $R_6$  归一化后为  $R_6'$ ;  $R_7$  为耕地面积, $R_7$  归一化后为  $R_7'$ 。

在计算抗灾因子安全性时,通常用灌木林面积、园林绿化与湿地面积来计算。影响因素主要为灌木林面积、园林绿化面积、湿地面积,综合三者的抗灾能力可以得出抗灾因子综合指标。

抗灾因子安全性指标计算式为

$$x_4 = 0.24R_8' + 0.14R_9' + 0.62R_{10}' \quad (4)$$

式中: $x_4$ 为抗灾因子安全性指标; $R_8$ 为灌木林面积, $R_8$ 归一化后为  $R_8'$ ;  $R_9$ 为园林绿化面积, $R_9$ 归一化后为  $R_9'$ ;  $R_{10}$ 为湿地面积, $R_{10}$ 归一化后为  $R_{10}'$ 。

#### 1.3.1.2 暴雨洪涝灾害风险指标评估

根据《暴雨洪涝灾害风险区划技术规范》和暴雨洪涝灾害风险的形成机制,参考相关暴雨洪涝灾害风险评估和区划要求,深入研究致灾因子危险性、孕灾因子敏感性、承灾因子易损性和抗灾因子安全性 4 个方面。采用加权综合法和指标归一化,借鉴承载体的脆弱性量化评价方法,结合研究区域近年暴雨洪涝灾害实例分析,借鉴已有数据库资源,形成无锡市城区暴雨洪涝灾害风险评估指数计算方法。

暴雨洪水灾害风险评估是对致灾因子危险性、孕灾因子敏感性、承受因子易损性以及抗灾因子安全性的系统分析和综合评估<sup>[5]</sup>。暴雨洪涝灾害风险评价指标综合评价因子的作用,采用加权综合法确定其因子权重,并通过一致性检验得到相关计算公式。

暴雨洪涝灾害风险指数计算式为

$$x = 0.41x_1 + 0.33x_2 + 0.15x_3 + 0.11x_4 \quad (5)$$

式中:  $x$  为暴雨洪涝灾害风险指数;  $x_1$  为致灾因子危险性;  $x_2$  为孕灾因子敏感性;  $x_3$  为承灾因子易损性;  $x_4$  为抗灾因子安全性。

由式(5)计算得到暴雨洪涝灾害风险指数,并按照暴雨洪涝灾害风险区划指标与评估模型,计算出每个评价单元的风险因子和评价指标( $X$ )值。

### 1.3.2 归一化计算法

在暴雨洪涝灾害风险评估体系中,将原始数据进行归一化处理,能够保证分析结果具有可靠性,数据之间更具可比性,并消除数据间不同量纲影响,从而提高数据的准确性。

指标因子归一化计算式为

$$X'_i = 0.5 + 0.5 \times \frac{x_i - X_{\min}}{X_{\max} - X_{\min}} \quad (6)$$

式中:  $X'_i$  为指标的量化值序列;  $x_i$  为查找到的源数据(水域面积、耕地面积等);  $X_{\max}$  为源数据序列中的最大值;  $X_{\min}$  为源数据序列中的最小值。

### 1.3.3 加权综合评价法

通过对不同计量单位影响因素的值进行标准化处理,能够将最终结果转化为综合指数,从而获得影响因素对目标指标的影响程度,实现影响因素对指数综合贡献的准确评估。

计算式为

$$X' = \sum_{i=1}^n d_i x_i \quad (7)$$

式中:  $X'$  为指标序列;  $d_i$  为第  $i$  个影响因子的权重;  $x_i$  为第  $i$  个影响序列。

## 2 研究成果

### 2.1 暴雨强度和频次统计分析

无锡市地处长江三角洲平原腹地,北依长江,南濒太湖,东与苏州接壤,西与常州毗邻。地形地貌以平原为主,在城区的西南方向有山峦分布,梅雨季节来临时城市内涝易发。2000—2020年无锡城区年降水量见图1。

由图1可以看出无锡城区年降水量总体呈增长趋势,年均降水量达1 161.58 mm。2000年、2005年、2010年、2020年的年降水量在1 000 mm左右,2015年的年降水量超年均降水量33.07%。本文在降水方面的年份选择上具有普特性,在风险评估上具有适应性,能够充分展现降水在无锡市城区近20年来风险评估中起到的关键性作用。

通过分析各级强度暴雨频次并依据暴雨强度所造成的破坏影响力,设置各风险等级的权重系数分别为1/15、2/15、3/15、4/15、5/15。按照百分位数确定不同等级所对应的降水阈值(表1),划分出各

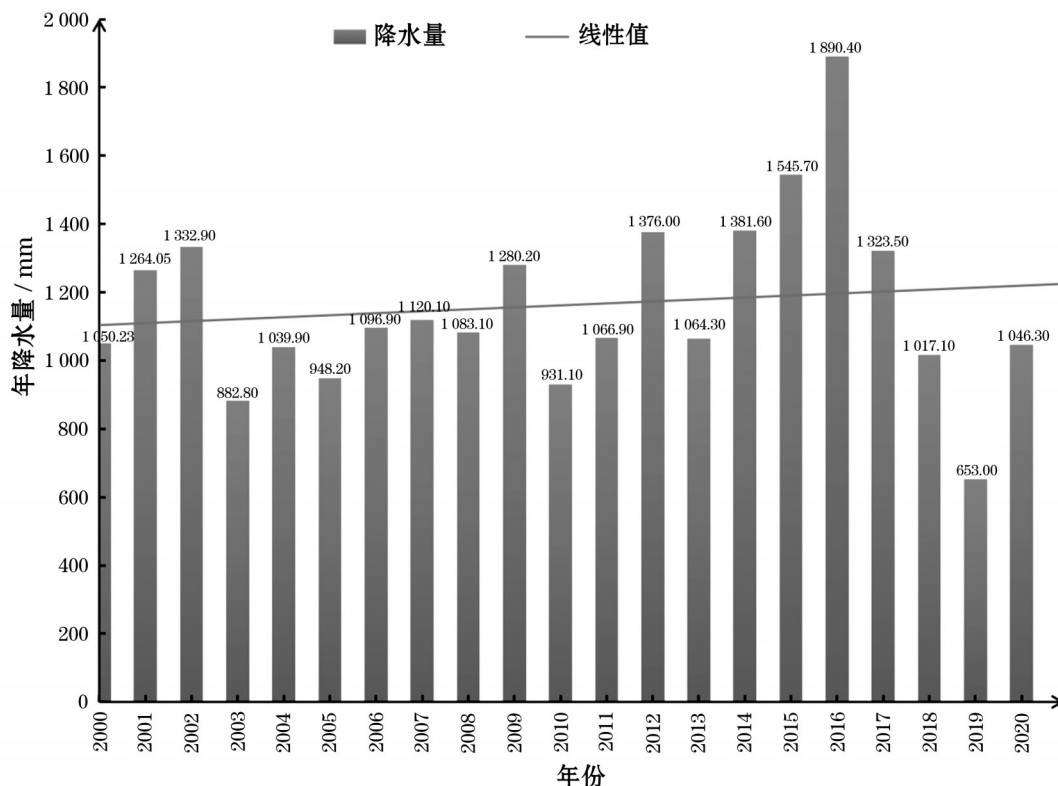


图1 2000—2020年无锡城区年降水量



表1 不同百分位数对应的暴雨强度阈值

百分位数/%	强度等级	暴雨强度/mm
[60.0,80.0)	1	[98.000,133.300)
[80.1,90.0)	2	[133.301,151.000)
[90.1,95.0)	3	[151.001,179.800)
[95.1,98.0)	4	[179.801,203.200)
[98.1,100.0)	5	$\geq 203.201$

级降水强度范围<sup>[5]</sup>。

## 2.2 透水层与不透水层面积变化对比

2000—2020年无锡市城区透水层面积与不透水层面积变化趋势如图2所示。

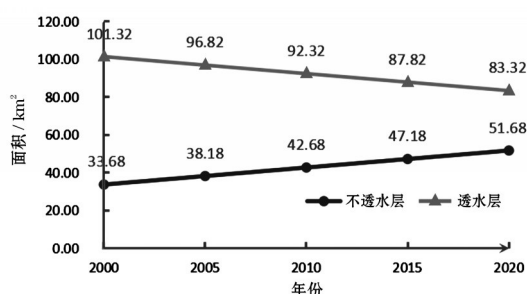


图2 2000—2020年无锡市城区透水层面积与不透水层面积变化趋势

近年来无锡市城区大力发展实体经济,强化企业科技主体地位,打造产业创新高地,以梁溪区为中心向外围开荒拓土、去林造城,随着城市用地的增加,透水层面积不断下降,不透水层面积不断上升。城市发展已影响到局部的大气热力属性,形成了特定的城市大气环流特征,产生了更为复杂的城市热岛环流效应,进而对城市内涝的发生产生重要影响。

据统计,2000—2010年无锡市城区不透水层面积由33.68 km<sup>2</sup>上升至51.58 km<sup>2</sup>,城区面积主要向惠山区与滨湖区扩张;2010—2020年无锡市城区面积主要向锡山区与新吴区扩张,城市发展迅速,不透水层面积大大增加。植被覆盖率发展趋势与城市不透水层相反,前期降低速度快,放缓节点在2015年。根据土地利用类型中各种透水层类型面积计算发现,无锡市城区透水层面积从2000年101.32 km<sup>2</sup>下降至2020年83.32 km<sup>2</sup>,整体蓄水能力、防洪固土能力的下降造成防洪抗涝压力逐年递增。

## 2.3 无锡市城区洪涝风险评估

随着经济社会的发展,城市化进程不断加快,

城市单位面积所承载的经济产出能力日益增强,与此同时灾害造成的损失比重也不断上升。本研究将暴雨洪涝灾害风险等级依次划分为低风险区(<0.35)、次低风险区(0.35~0.45)、中等风险区(0.45~0.60)、次高风险区(>0.60)4个风险等级,暴雨洪涝灾害风险指数越高,说明未来暴雨侵袭可能造成经济损失越大。

2000年,无锡市城区中风险面积主要集中在梁溪区以及滨湖区东北部,城区中主要存在房屋修建标准偏低、管道排水能力不足及部分河道淤塞等问题。2005年,台风“麦莎”来袭,由于下游望虞河处于行洪期,加之洪水东排受阻,无锡市城区内高水位持续时间长,因而防汛压力陡升,中风险面积几乎覆盖了整个城区。2010年,由于气流之间的相互对冲,削弱了对无锡城区的影响,中风险地区主要集中在梁溪区、锡山区西南部、新吴区西北部、滨湖区东北部以及惠山区东南部。2015年,由于“灿鸿”台风的来袭,无锡市城区内普降大暴雨,受下垫面限制等因素,次高风险面积覆盖了无锡市城区的绝大部分地区,剩余地区面积为中等风险。2020年,台风“黑格比”过境带来短暂强降雨,因锡沪路路段积水严重且贯穿城区,无锡市城区当年洪涝风险评估指数总体在中等以上。由于梁溪区与新吴区不透水层面积较大且绿化面积相比于其他市辖区较少,因此风险等级略高于其他市辖区;次高风险面积覆盖了梁溪区,中等风险面积覆盖了惠山区、锡山区与滨湖区;对新吴区而言,次高风险面积由西北至东南逐渐减少。

## 3 成果分析

本文利用2000—2020年无锡市地面观测站点日降水资料,结合30 m分辨率DEM数据、30 m土地利用类型(CLCD)数据与社会经济数据资料,采用暴雨洪涝灾害风险评估指数计算方法、归一化计算方法、加权综合评价法与ArcGIS空间处理法,从致灾因子危险性、孕灾因子敏感性、承灾因子易损性、抗灾因子安全性4个方面,针对无锡市城区进行暴雨洪涝灾害风险评估分析。

(1)由无锡市城区近年来的降水量数据可知,2000—2020年无锡市城区年暴雨频次(降水量 $\geq 50$  mm)由1 d增加为3 d;年均降水量达1 161.58 mm,年降水量总体呈现增长趋势。

(2)无锡市城区近20年下垫面透水层与不透水

(下转第69页)

行。将此时机架盖板上方剩余螺杆长度标记为 $L_2$ , $L_1$ 与 $L_2$ 差值即为螺杆的变形程度。报警阈值设置过大,可能会引起误动作,影响开闸效率;报警阈值设置过小,则保护不及时,螺杆会出现轻微变形。经过多次试验,在失去限位开关保护的情况下,闸门均能在下行至闸底板后自行停机,且 $L_1$ 和 $L_2$ 之差在1.5 mm以内,最终报警阈值设为200 mm/min。

上述试验证明此种保护方案是切实可行的。螺杆式启闭机预防螺杆压弯保护系统测量精准、反应灵敏、动作可靠、经济有效。在闸门下行过程中实现预防螺杆被压弯,同理在闸门上升过程中也能

起到过载保护,实现分类分区保护,可在类似系统中推广应用。

#### 参考文献:

- [1] 徐斌山,李国晶. 西门子S7-200 SMART PLC实战精讲[M]. 北京:清华大学出版社,2021.
- [2] 徐宁,赵丽君. 西门子S7-200 SMART PLC编程及应用[M]. 北京:清华大学出版社,2021.
- [3] 段礼才,黄文钰. 西门子S7-1200 PLC编程及使用指南[M]. 北京:机械工业出版社,2020.
- [4] 王兆宇. 施耐德PLC电气设计与编程自学宝典[M]. 北京:中国电力出版社,2015.

(上接第65页)

层面积变化表明,不透水层面积以梁溪区为中心向外扩增53.44%,透水层面积减少17.77%,城区下垫面的整体下渗率有所降低。

(3)本文所运用暴雨洪涝灾害风险指标建立模型与综合评价指标(低、次低、中等、次高),重点分析无锡市城区2000年、2005年、2010年、2015年与2020年暴雨洪涝灾害风险等级分布情况,可为城区防洪及规划建设提供参考。

(4)由于所收集数据种类的局限性,未能考虑到城市水网分布、雨水设施建设等影响因素,下阶段可收集更加完善的基础数据资料,基于《暴雨洪涝灾害风险区划技术规范》进行模型构建与数据处理,为防汛排涝、监测预报等提供更科学的参考依据。

#### 参考文献:

- [1] 温克刚,丁一汇. 中国气象灾害大典:综合卷[M]. 北京:

气象出版社,2008.

- [2] 张金良,罗秋实,王冰洁,等. 城市极端暴雨洪涝灾害成因及对策研究进展[J]. 水资源保护,2024,40(1):6-15.
- [3] 梅超,刘家宏,王浩,等. 以事件为中心的城市洪涝调度模式研究[J]. 水资源保护,2022,38(5):46-50.
- [4] 盛龙寿,秦建国,姚华,等. 无锡市区2017年暴雨洪水及其成因分析[J]. 江苏水利,2020(12):32-34.
- [5] 李树军,袁静,何永健,等. 基于GIS的潍坊市暴雨洪涝灾害风险区划[J]. 中国农学通报,2012,28(20):295-301.
- [6] 邹洁云,陈苏婷. 基于样条插值法与GIS的江苏省暴雨洪涝风险评估[J]. 电脑知识与技术,2014,10(22):5380-5384.
- [7] 刘建芬,张行南,唐增文,等. 中国洪水灾害危险程度空间分布研究[J]. 河海大学学报(自然科学版),2004(6):614-617.