

基于ArcGIS的长三角地区暴雨灾害风险评估研究

王金虎^{1,2,3,4}, 许俊辉^{1,2}

¹南京信息工程大学气象灾害预报预警与评估协同创新中心, 江苏 南京

²中国气象局气溶胶与云降水重点开放实验室, 江苏 南京

³中国科学院中层大气和全球环境探测重点实验室, 北京

⁴南京信大安全应急管理研究院, 江苏 南京

收稿日期: 2024年2月23日; 录用日期: 2024年6月23日; 发布日期: 2024年6月30日

摘要

选取长三角地区222个气象站1960~2015年气象资料, 按照暴雨过程危险性等级评估技术规范结合层级分析法和专家打分法从暴雨洪涝灾害的危险性、敏感性、易损性和防灾减灾能力4个因子入手, 选取13个暴雨洪涝灾害综合风险评价指标, 建立长三角地区暴雨洪涝灾害综合风险评估模型。结果表明暴雨洪涝灾害危险性空间分布上, 安徽西南部和浙江南部地区危险性最高, 安徽中部、北部和浙江中部、北部地区最低。敏感性而言, 浙江除北部以外大部分地区和安徽安庆、黄山地区敏感性较高, 安徽中部、北部和江苏中部、北部地区最低。易损性方面, 江苏南部和上海市易损性最高, 安徽南部和浙江西南部易损性最低。防灾减灾能力方面, 安徽整体防灾能力最弱, 合肥、南京、无锡、苏州、杭州和宁波防灾能力较高, 防灾能力最强的地区为上海。综合四个因子, 安徽西南部和浙江东南部地区暴雨灾害的风险等级最高, 上海市暴雨灾害风险等级较高。安徽中部、北部和江苏发生暴雨灾害的风险较小。

关键词

长三角, ArcGIS, 暴雨灾害, 风险评估

Risk Assessment of Rainstorm Disasters in the Yangtze River Delta Region Based on ArcGIS

Jinhu Wang^{1,2,3,4}, Junhui Xu^{1,2}

¹Collaborative Innovation Center for Forecasting, Early Warning and Evaluation of Meteorological Disasters, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing Jiangsu

²Key Laboratory of Aerosol and Cloud Precipitation, China Meteorological Administration, Nanjing Jiangsu

³Key Laboratory of Exploration of the Middle Atmosphere and Global Environment, Chinese Academy of Sciences, Beijing

⁴Nanjing Xinda Safety Emergency Management Research Institute, Nanjing Jiangsu

Received: Feb. 23rd, 2024; accepted: Jun. 23rd, 2024; published: Jun. 30th, 2024

Abstract

The meteorological data of 222 meteorological stations in the Yangtze River Delta region from 1960 to 2015 were selected, and 13 comprehensive risk assessment indexes of rainstorm and flood disasters were selected according to the technical standards for rainstorm process risk grade assessment, combined with hierarchical analysis method and expert scoring method, starting with the four factors of rainstorm and flood disaster risk, sensitivity, vulnerability and disaster prevention and mitigation ability. Establish a comprehensive risk assessment model of rainstorm and flood disaster in Yangtze River Delta region. The results showed that the spatial distribution of rainstorm and flood hazard was the highest in southwest Anhui and southern Zhejiang, and the lowest in central and northern Anhui and central and northern Zhejiang. In terms of sensitivity, most areas except the northern part of Zhejiang Province and Anqing and Huangshan areas of Anhui Province have higher sensitivity, while central and northern Anhui province and central and northern Jiangsu Province have the lowest sensitivity. In terms of vulnerability, southern Jiangsu and Shanghai have the highest vulnerability, and southern Anhui and southwest Zhejiang have the lowest vulnerability. In terms of disaster prevention and reduction ability, Anhui has the weakest overall disaster prevention ability, Hefei, Nanjing, Wuxi, Suzhou, Hangzhou and Ningbo have higher disaster prevention ability, and Shanghai has the strongest disaster prevention ability. According to the four factors, the risk level of rainstorm disaster in southwest Anhui and southeast Zhejiang is the highest, and the risk level of rainstorm disaster in Shanghai is higher. Central and northern Anhui and Jiangsu provinces are less at risk of rainstorm disasters.

Keywords

Yangtze River Delta, ArcGIS, Rainstorm Disaster, Risk Assessment

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

长三角地区地处东亚季风区, 气候湿润, 暴雨活动频繁。1991 年太湖流域持续性暴雨, 1998 年长江流域再次发生全流域特大洪水, 1999 年太湖流域再次发生持续性暴雨, 形成特大洪涝灾害, 造成严重损失 [1]。随着全球气候变暖, 极端异常天气频繁发生, 给区域社会、经济的正常发展带来影响。气象灾害风险评估是国内外学者关注的热点, 从 20 世纪 30 年代开始, 国外学者就开展了初步的研究 [2]-[5]。20 世纪 70 年代, 英国、美国等发达国家对台风、干旱、龙卷风等气象灾害的风险评估工作已趋于成熟。相对而言, 我国对气象灾害风险评估工作起步较晚, 直到 20 世纪 90 年代, 对气象灾害的评估研究工作才开始受到重视 [6]。暴雨灾害是主要的气象灾害之一, 越来越多的学者也开始重视灾害风险评估的研究, 国内学者和国外学者对区域降水时间、空间分布的特征, 已有诸多研究。总体而言, 暴雨灾害风险评估是对其孕灾环境敏感性、致灾因子危险性、承灾体易损性和相应的防灾减灾能力的综合评估。近年来, 该

领域的研究取得较大进展,周成虎[7]、张行南[8]等以暴雨洪涝灾害为研究对象,选取不同的致灾因子,利用统计分析方法构建了灾害评估模型,对国内不同省市的暴雨洪涝灾害的风险进行评价。目前,对暴雨灾害风险评估的研究很多,常用的风险评价技术方法有指数法、专家打分法、层次分析法等,国内外学者基于以上方法开展了众多区域的多种气象灾害风险评估研究[9]-[14]。也有不少学者对长江流域暴雨进行了研究。但目前针对经济发达、人口密度大、暴雨频发、洪涝严重的长三角地区汛期暴雨的研究甚少,因此本文将对长三角地区暴雨灾害致灾因子、孕灾环境、承灾体和防灾减灾能力进行分析,采用层次分析法和专家打分法对长三角地区暴雨灾害风险进行评估。

2. 研究资料及方法

2.1. 研究区域概况

长三角地区指的是我国东部地区的一个重要地理区域,由上海、江苏、浙江和安徽四个省份组成,地处长江三角洲地带,是中国经济最发达的地区之一。长三角地区以上海、南京、杭州等城市为中心,拥有发达的制造业、服务业和金融业,是中国最具活力和竞争力的地区之一。同时,长三角地区也面临着诸多暴雨灾害风险,该地区属亚热带季风气候,雨水充沛,汛期为5~9月,暴雨频繁,降雨强度大,极端天气事件较为常见,容易引发洪涝灾害。长三角地区地势较为复杂,包括丘陵、平原、河流等地貌类型,地形起伏较大,易导致降雨集中和水流迅速聚集,增加了暴雨灾害的风险。长三角地区城市化水平较高,城市建设密度大,土地利用方式单一,地表硬化严重,导致雨水难以渗透,增加了城市内的内涝和排水难题。长三角地区拥有众多河流和水系,若降雨过程集中,河流水位迅速上涨,易造成河水泛滥和山洪暴发,引发洪水灾害。

2.2. 研究资料

选用长三角地区的222个基准气象测站作为样本,如图1所示,资料基本涵盖了全地区,且时间较长,数据齐全,具有较好的代表性。根据222个气象测站1960~2015年逐日降水数据,统计出不同测站汛期暴雨量、暴雨日数。地理信息数据提取90 m精度的DEM高程数据,长三角地区的各县土地面积、人口数量、GDP等社会经济数据来源于中国科学院地理科学与资源研究所。气象上把24小时降水量 ≥ 50 mm降水过程定义为1个暴雨日。

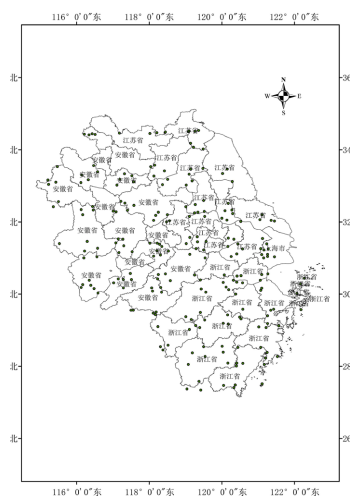


Figure 1. Meteorological station distribution map in Yangtze river delta region
图1. 长三角地区气象测站分布图

2.3. 研究方法

气象灾害致灾因子相对其他风险影响因素具有多变性特点, 往往在成灾过程中起关键作用[15], 从致灾因子危险性、孕灾环境敏感性、承灾体易损性和防灾减灾能力对长三角地区暴雨灾害风险进行评估。参考浙江省气象局暴雨过程危险性等级评估技术规范对暴雨灾害风险进行评价研究。暴雨灾害致灾因子危险性的评估方法主要考虑暴雨过程强度指数和暴雨孕灾环境影响系数两方面, 量化指标为暴雨过程危险性指数。其中暴雨过程强度指数由暴雨过程降雨量、降雨强度和暴雨日数组成, 暴雨孕灾环境系数由地形因子影响系数、水系因子影响系数、坡度和地质条件影响系数组成。选取人口密度、地均 GDP、耕地比重作为承灾体易损性影响因素。选取居民人均收入、地方财政预算收入和医疗人员数量作为防灾减灾能力影响因素。结合层次分析法和专家打分法构建暴雨灾害危险性评价体系(图 2)。在此基础上, 利用 ArcGIS 软件制作长三角地区暴雨风险区划图并进行分析。

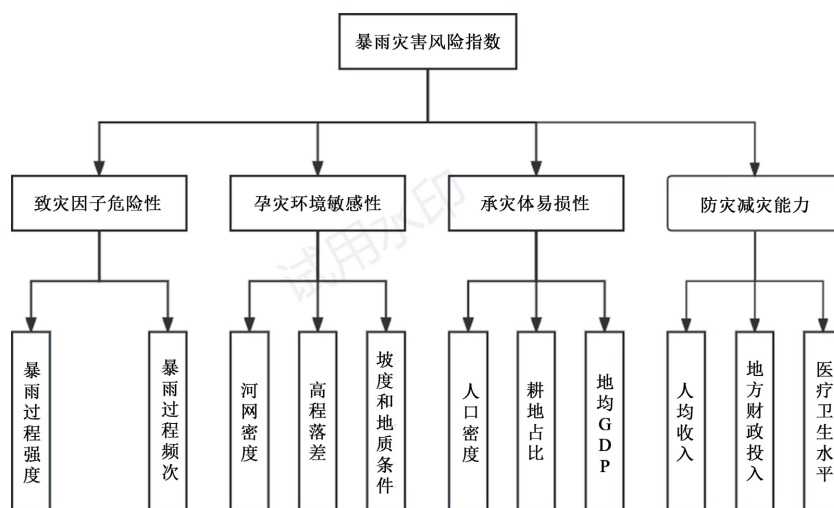


Figure 2. Rainstorm risk assessment index system
图 2. 暴雨风险评估指标体系

2.4. 层次分析法

层次分析法(AHP)是一种多准则决策方法, 由 T. L. Saaty 教授于 20 世纪 70 年代提出。该方法通过构建层次结构, 将决策问题分解为目标层、准则层和方案层, 并对这些因素进行两两比较, 以确定它们之间的相对重要程度。通过构建判断矩阵, 并应用特征值法或最大特征值法来计算权重向量, AHP 能够确立各因素的权重。在权重确定后, AHP 对备选方案进行评估和排序, 以支持最优的决策选择。该方法在工程管理、投资决策和供应链管理等领域广泛应用, 尤其适用于复杂多准则决策问题的分析和解决, 因其将定性分析与定量分析相结合、系统简洁灵活的特点而受到重视。通过比较各层因素, AHP 法能够得出各个指标重要性的权重值, 进而构建综合指数模型。

2.5. 克里格插值法

克里格插值法(Kriging)是一种空间插值方法, 常用于地理信息系统(GIS)和地质勘探中。该方法基于地理空间数据的统计特性, 利用已知的数据点之间的空间相关性来推断未知位置的数值。克里格插值法假设了空间数据的平稳性和空间自相关性, 通过半变异函数描述了数据之间的空间相关性, 从而实现了未知位置的预测。该方法可用于生成连续的地表高程、土壤属性、水文要素等地理数据的表面模型,

从而支持地质勘探、资源评估、环境监测等应用领域的空间分析和决策。克里格插值法的优点在于能够考虑空间数据之间的空间自相关性, 且提供了对插值结果的不确定性估计。然而, 克里格插值法也存在对数据平稳性和空间相关性的假设要求, 以及对半变异函数参数的选择和模型的拟合等挑战。在插值过程中, 克里格法能够根据数据之间的空间关系进行适当的权衡, 从而获得更为准确和可靠的估计结果。因此, 克里格法被广泛应用于地理信息系统、地质勘探、环境监测等领域中的数据插值和空间分析任务中。

3. 数据处理

3.1. 致灾因子

暴雨过程危险性指暴雨过程对人类社会和经济可能造成的危害。这一评估方法主要考虑了暴雨过程的强度和孕灾环境两方面, 利用暴雨过程危险性指数进行量化评估。该指数由暴雨过程强度指数和暴雨孕灾环境影响系数两部分组成。长三角地区暴雨洪涝灾害主要由于连续性的集中降雨引发。评估过程中, 首先使用 MATLAB 处理长三角地区的降水数据, 获取各站点的暴雨过程降雨量、降雨强度、暴雨日数和暴雨过程频次数据。随后, 根据暴雨过程危险性评估方法, 利用 MATLAB 计算各站点的暴雨过程强度指数, 从而对暴雨过程的危险性进行评估。暴雨过程危险性指数计算方法如公式(1)所示:

$$I = (1 + I'_e) I_f \quad (1)$$

式中:

I ——暴雨过程危险性指数;

I'_e ——暴雨孕灾环境影响系数, 负值表示孕灾环境对成灾危险性起削减作用, 正值表示加重成灾危险性;

I_f ——暴雨过程强度指数。

暴雨过程强度计算

根据暴雨过程降雨量、降雨强度、暴雨日数等, 计算得到暴雨过程强度指数, 计算方法如公式(2)所示:

$$I_f = 0.38 * R_{all} / 100 + 0.30 * \max(R_3 / 20, R_{12} / 30, R_{24} / 50) + 0.32 * R_d \quad (2)$$

式中:

I_f ——暴雨过程强度指数;

R_n ——过程降雨量, 单位为毫米(mm);

$\max()$ ——取最大值函数(表征降雨强度), R_3 、 R_{12} 、 R_{24} 分别为3小时、12小时、24小时最大雨量, 单位为毫米(mm);

R_d ——一次暴雨过程的暴雨日数, 单位为天(d)。

在得到长三角地区各站点暴雨过程强度指数和频次数据之后, 统计长三角地区所有气象站1960~2015年中每次暴雨过程的强度指数。运用百分位法, 将长三角地区各站点1960~2015年中每次暴雨过程强度指数分别按60%、80%、90%、95%、98%位从低到高划分为5个等级, 将五个等级的暴雨过程强度指数加权求和得到每个站点最终的暴雨过程强度指数, 结果如图3所示。

3.2. 孕灾环境

灾害的发生, 不仅与致灾因子有关, 而且与自然地理环境有关。使用孕灾环境敏感性来表征自然地理环境对暴雨灾害的影响。孕灾环境敏感性评估是暴雨灾害综合风险区划中较为重要的一部分。研究暴雨灾害需要通过对不同孕灾环境进行分析, 选择合适的孕灾环境因子, 提高暴雨灾害综合评估的准确性。

站点	经度	纬度	1级	2级	3级	4级	5级						
丰县	116.34	34.41	35.29658	2.353105333	21.63206	2.884274667	3.5696	0.71392	13.19056	3.517482667	2.94542	0.981806667	10.45058933
沛县	116.51	34.42	28.8642	1.92428	23.02178	3.069570667	11.01762	2.203524	6.5852	1.756053333	6.34556	2.115186667	11.06861467
碭山	116.21	34.43	39.01234	2.600822667	16.74776	2.233034667	10.39664	2.079328	2.39314	0.638170667	5.66378	1.887926667	9.439282667
萧县	116.43	34.44	34.24256	2.282837333	29.37176	3.916234667	15.01184	3.002368	8.38902	2.237072	3.99108	1.33036	12.768872
邳州	118.02	34.45	52.00502	3.467001333	34.23086	4.564114667	9.3215	1.8643	6.68388	1.782368	11.50448	3.834826667	15.51261067
徐州	117.18	34.46	50.42964	3.361976	23.55994	3.141325333	8.95352	1.790704	2.084	0.555733333	8.5149	2.8383	11.68803867
新沂	118.21	34.47	61.72052	4.114701333	20.52748	2.736997333	7.21968	1.443936	8.24744	2.199317333	6.22644	2.07548	12.570432
东海	118.44	34.48	54.9505	3.663366667	21.5833	2.877773333	15.76294	3.152588	2.15652	0.575072	5.98282	1.994273333	12.26307333
沭阳	118.45	34.49	57.29374	3.819582667	33.73754	4.498338667	15.8223	3.16446	13.28604	3.542944	3.11006	1.036686667	16.062012
赣榆	119.08	34.5	63.41056	4.227370667	35.02984	4.670645333	21.01132	4.202264	14.96172	3.989792	12.24886	4.082953333	21.17302533
西连岛	119.26	34.51	58.96712	3.931141333	28.2004	3.760053333	25.25384	5.050768	8.7592	2.335786667	7.20416	2.401386667	17.479136
连云港	119.1	34.52	56.55038	3.770025333	39.4119	5.25492	14.49508	2.899016	15.58182	4.155152	5.722	1.907333333	17.98646667
响水	119.36	34.53	38.1078	2.54052	17.3685	2.3158	5.36538	1.073076	15.30988	4.082634667	18.1653	6.0551	16.06713067
灌云	119.14	34.18	45.54226	3.036150667	38.22616	5.096821333	12.29436	2.458872	7.07562	1.886832	11.6861	3.895366667	16.37404267
灌南	119.22	34.07	45.57362	3.038241333	20.25354	2.700472	16.05064	3.210128	15.1917	4.05112	9.30684	3.10228	16.10224133
滨海	119.49	34.02	48.87236	3.258157333	32.33498	4.311330667	9.17722	1.835444	15.36908	4.098421333	5.33686	1.778953333	15.28230667
亳州	115.47	33.53	38.25088	2.550058667	20.30856	2.707808	16.10774	3.221548	8.66164	2.309770667	8.14164	2.71388	13.50306533
临泉	115.23	33.04	40.25256	2.683504	25.54664	3.406218667	17.78164	3.556328	17.18726	4.583269333	9.58854	3.19618	17.4255
界首	115.23	33.16	37.3745	2.491633333	20.6875	2.758333333	7.29114	1.458228	15.4667	4.124453333	16.57548	5.52516	16.357808
太和	115.43	33.1	37.90984	2.527322667	15.99552	2.132736	18.03356	3.606712	11.44196	3.051189333	11.5698	3.8566	15.17456
颍溪	116.47	33.56	43.6753	2.911686667	26.40024	3.520032	11.0119	2.20238	8.14944	2.173184	5.2256	1.741866667	12.54914933
颍阳	116.14	33.3	44.5245	2.9683	14.45302	1.927069333	17.58424	3.516848	8.47046	2.258789333	2.64738	0.88246	11.55346667
利辛	116.12	33.09	41.41438	2.760958667	22.9777	3.063693333	17.72674	3.545348	13.09498	3.491946667	2.5789	0.859633333	13.721628
蒙城	116.32	33.17	41.46292	2.764194667	20.7633	2.76844	26.99776	5.399552	1.97894	0.527717333	9.62154	3.20718	14.667084
宿州	116.58	33.39	43.21176	2.880784	23.70132	3.160176	15.71242	3.142484	6.64448	1.771861333	7.43212	2.477373333	13.43267867
灵璧	117.32	33.33	43.0971	2.87314	31.5689	4.209186667	16.04108	3.208216	8.9439	2.38504	5.20448	1.734826667	14.1040933
泗县	117.52	33.28	36.71516	2.447677333	23.60098	3.146797333	14.35598	2.871196	8.6878	2.316746667	8.42902	2.809673333	13.59209067
怀远	117.11	33.02	35.97428	2.398285333	41.28062	5.504082667	14.17816	2.835632	4.26014	1.136037333	5.37332	1.791106667	13.665144
固镇	117.19	33.18	36.72254	2.448169333	28.45172	3.793562667	15.78404	3.156808	4.67744	1.247317333	6.55132	2.183773333	12.82963067
五河	117.57	33.11	52.14176	3.476117333	38.4247	5.123293333	10.56862	2.113724	15.07268	4.019381333	5.7722	1.924066667	16.65658267
睢宁	118.04	33.53	53.6162	3.574413333	38.0686	5.075813333	12.1257	2.42514	13.15164	3.507104	15.04902	5.01634	19.59881067
宿豫	118.15	33.57	45.88082	3.058721333	32.57928	4.343904	26.64314	5.328628	8.5498	2.279946667	8.46204	2.82068	17.83188
泗阳	118.42	33.41	37.44578	2.496385333	32.74382	4.365842667	12.53172	2.506344	13.20656	3.521749333	14.64412	4.881373333	17.77169467
泗洪	118.13	33.27	40.72446	2.714964	24.52416	3.269888	9.06596	1.813192	10.95826	2.922202667	8.49972	2.83324	13.55348667
盱眙	118.37	33.03	47.25778	3.150518667	35.65042	4.753389333	13.87526	2.775052	10.76474	2.870597333	3.01138	1.003793333	14.55335067
洪泽	118.51	33.18	39.72532	2.648354667	45.45772	6.061029333	10.52078	2.104156	8.68656	2.311616	9.63858	3.21286	16.338016
涟水	119.14	33.46	37.98184	2.532122667	46.04114	6.138818667	17.55508	3.511016	11.13282	2.968752	0	15.15070933	0
阜宁	119.48	33.48	33.5987	2.239913333	34.93636	4.658181333	25.23484	5.046968	13.2128	3.523413333	3.51372	1.17124	16.639716
淮安	119.1	33.32	44.48922	2.965948	17.55216	2.340288	18.24752	3.649504	11.03582	2.942885333	8.19922	2.733073333	14.63169867
建湖	120.02	33.34	54.018	3.6012	21.68616	2.891488	14.63988	2.927976	8.58398	2.289061333	2.61712	0.872373333	12.58209867
金湖	119.02	33.02	56.46218	3.764145333	28.71004	3.828005333	18.30568	3.661136	13.24052	3.530805333	2.5939	0.864633333	15.64872533
宝应	119.18	33.14	58.93086	3.928724	26.62184	3.549578667	7.13014	1.426028	8.1484	2.172906667	3.54122	1.180406667	12.257644
射阳	120.15	33.46	45.1287	3.00858	30.31848	4.042464	19.90008	3.980016	6.21374	1.656997333	12.13882	4.046273333	16.73433067

Figure 3. Intensity index of rainstorm process in the Yangtze River Delta
图3. 长三角地区暴雨过程强度指数

长三角地区暴雨灾害的孕灾环境主要考虑了地形影响因子、水系影响因子、坡度和地质条件影响因子。暴雨孕灾环境指暴雨影响下，对形成洪涝、泥石流、滑坡等次生灾害起作用的自然环境。暴雨孕灾环境对暴雨成灾危险性起扩大或缩小作用。暴雨孕灾环境综合指数计算方法如公式(3)所示。

$$I_e = W_h P_h + W_r P_r + W_d P_d \tag{3}$$

式中：

- I_e ——暴雨孕灾环境综合指数；
- P_h ——地形因子影响系数；
- W_h ——地形因子权重系数；
- P_r ——水系因子影响系数；
- W_r ——水系因子权重系数；
- P_d ——地质灾害易发条件系数；
- W_d ——地质灾害易发条件权重系数。

其中， $W_h + W_r + W_d = 1$ 。

计算完暴雨孕灾环境综合指数后，进行暴雨孕灾环境影响系数计算，方法如公式(4)所示：

$$I'_e = -c + 2c \left(\frac{I_e - I_{e\min}}{I_{e\max} - I_{e\min}} \right) \tag{4}$$

式中：

- I'_e ——暴雨孕灾环境影响系数
- I_e ——暴雨孕灾环境综合指数

$I_{e\max}$ ——同一区块内的最大暴雨孕灾环境综合指数

$I_{e\min}$ ——同一区块内的最小暴雨孕灾环境综合指数

C ——常数, 宜取 0.2~0.4。

3.2.1. 地形因子影响系数赋值

要进行地形因子影响系数赋值就需要计算出所在地区的高程标准差, 如表 1 所示, 以评估点为中心, 计算评估点与若干邻域点的高程标准差 s , 计算方法如公式(5)所示:

$$S_h = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n (h_j - h)^2}{n}} \quad (5)$$

式中:

S_h ——高程标准差;

h_j ——邻域点海拔高度, 单位为米(m);

h ——评估点海拔高度, 单位为米(m);

n ——邻域点的个数, n 值宜大于等于 9。

根据高程标准差值 S_h 及海拔高度, 确定地形因子影响系数。

Table 1. Standard deviation for elevation

表 1. 高程标准差

高程标准差	海拔高度/m				
	<100	[100, 300)	[300, 500)	[500, 800)	≥800
<1	0.9	0.8	0.7	0.6	0.5
[1, 10)	0.8	0.7	0.6	0.5	0.4
[10, 20)	0.7	0.6	0.5	0.4	0.3
≥20	0.5	0.4	0.3	0.2	0.1

3.2.2. 水系因子影响系数赋值

使用的赋值方法是水网密度赋值法, 水网密度指流域内干支流总河长与流域面积的比值或单位面积内自然与人工河道的总长度, 水网密度反映了一定区域范围内河流的密集程度, 按公式(6)计算:

$$S_r = \frac{L_r}{a} \quad (6)$$

式中:

S_r ——水网密度, 单位为 1/公里(1/km)

L_r ——水网长度, 单位为公里(km)

a ——区域面积, 单位为平方公里(km²)

根据水网密度, 取相应水系因子影响系数, 如表 2 所示。

Table 2. Assignment of water system factor influence coefficients

表 2. 水系因子影响系数赋值

水网密度	P_r
<0.01	0

续表

[0.01, 0.24)	0.1
[0.24, 0.41)	0.2
[0.41, 0.57)	0.3
[0.57, 0.74)	0.4
[0.74, 0.91)	0.5
[0.91, 1.08)	0.6
[1.08, 1.24)	0.7
[1.24, 1.41)	0.8
≥1.41	0.9

3.2.3. 坡度和地质条件因子影响系数赋值

根据坡度和地质灾害易发程度, 按表 3 对坡度和地质条件因子影响系数进行赋值:

Table 3. Assignment of influencing coefficients of slope and geological conditions

表 3. 坡度和地质条件因子影响系数赋值

地质灾害易发等级	坡度					
	[4°~6°)	[6°~8°)	[8°~10°)	[10°~15°)	[15°~20°)	≥20°
不易发和低易发	0.1	0.3	0.5	0.7	0.8	0.9
中易发和高易发	0.2	0.4	0.6	0.8	0.9	0.9
高易发	0.3	0.5	0.7	0.8	0.9	0.9

3.3. 承灾体

承灾体易损性指的是可能受到暴雨灾害危害的所有人员和财产, 以及可能遭受的损失程度。在评估易损性时, 通常考虑到人口和财产的集中程度, 因为集中度越高, 遭受暴雨灾害的风险就越大。选择长三角地区的人口密度、地均 GDP 和耕地面积比作为衡量承灾体易损性的影响因素。为了确定各因素的权重, 采用了层次分析法。经过计算, 判断矩阵的随机一致性比率为 0.0721, 小于 0.1, 表明具有一致性。得出承灾体易损性评估模型如下所示:

$$S \text{ 易损性指数} = 0.5257A + 0.3568B + 0.1175C \tag{7}$$

式中: S 易损性指数为暴雨易损性指数, A 为人口密度, B 为地均 GDP, C 为耕地面积占比。A、B、C 均为归一化后的数据。

3.4. 防灾减灾能力

防灾减灾能力是指承灾体的灾前准备能力、灾中应急能力和灾后恢复能力。常用指标有居民人均收入、地方财政预算收入、医疗人员数量等。参考已有研究确定权重, 按公式计算

$$R \text{ 防灾减灾能力} = 0.463X + 0.245Y + 0.292Z \tag{8}$$

式中: X 为居民人均收入, Y 为地方财政预算收入, Z 为医疗人员数量。X、Y、Z 均为归一化后的数据。

4. 长三角地区暴雨洪涝灾害综合风险评估模型的建立

史培军提出的灾害系统功能体系为自然灾害的风险评估提供了重要思路, 张继权等在此基础上进一步提出了自然灾害风险“四因子”理论, 张继权提出的自然灾害风险理论是一种系统性的理论框架, 用于综合评估自然灾害对人类社会经济造成的潜在损失。该理论强调了对自然灾害风险的全面认识和综合评估, 主要包括对致灾因子的危险性、孕灾环境的敏感性、承灾体的易损性以及防灾减灾能力进行系统性综合评估。针对暴雨洪涝灾害, 综合考虑了这四个方面的因素, 构建了综合风险评估模型。该模型综合考虑了是对暴雨洪涝灾害综合风险的综合评估函数。根据已有研究成果, 长三角地区暴雨洪涝灾害综合风险评估模型可以通过公式(9)进行计算得出:

$$F = 0.44X_a + 0.21X_b + 0.25X_c + 0.1X_d \quad (9)$$

式中 F 为暴雨洪涝灾害综合风险指数, X_a 为致灾因子危险性, X_b 为孕灾环境敏感性, X_c 为承灾体易损性, X_d 为防灾减灾能力。

5. 结果分析

5.1. 致灾因子危险性分析

对长三角地区各站点的危险性指数进行归一化处理之后, 采用反距离权重插值法进行空间插值, 采用自然断点法进行分级, 长三角地区暴雨洪涝灾害的危险性评价结果如图 4 所示。高危险区和较高危险区主要出现在长三角西南地区, 安徽省黄山市和浙江省温州市因暴雨频繁、地形陡峭、水网密集、地质灾害易发导致暴雨洪涝灾害的危险性处于较高水平。安徽省安庆市、池州市, 浙江省衢州市、丽水市和台州市危险等级较高。其余地方危险等级不高。

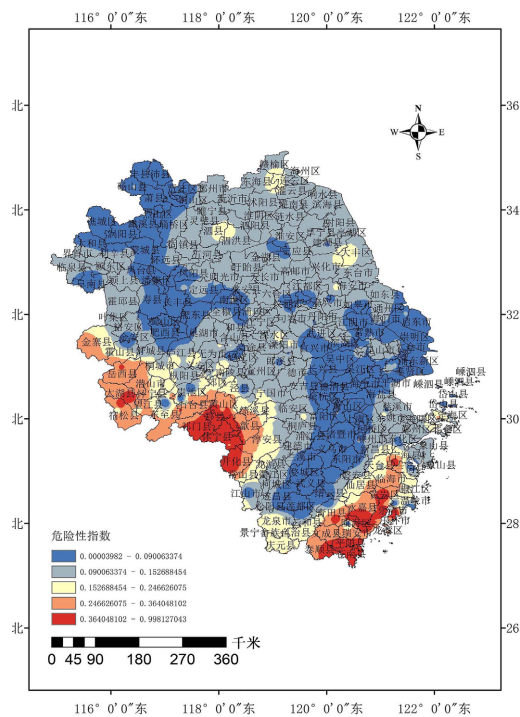


Figure 4. Rainstorm disaster risk index in the Yangtze River Delta region

图 4. 长三角地区暴雨灾害危险性指数

5.2. 孕灾环境敏感性分析

对长三角地区各县依据公式进行赋值后得到各县的地形因子影响系数、水系因子影响系数、坡度和地质条件影响系数, 完成赋值后再根据公式算出各县的孕灾环境综合指数如图 5 所示。浙江除北部以外大部分地区 and 安徽安庆、黄山地区敏感性较高, 安徽中部、北部和江苏中部、北部地区最低。

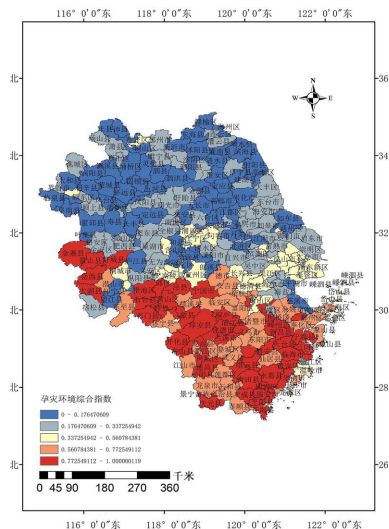


Figure 5. Environmental composite index of rainstorm disaster

图 5. 暴雨孕灾环境综合指数

5.3. 承灾体易损性分析

将长三角地区人口密度、地均 GDP 和耕地占比进行归一化之后, 按照公式(7)进行计算得到长三角地区承灾体易损性等级, 如图 6 所示。江苏南部和上海市易损性最高, 主要原因是人口密集, 经济发达, 安徽南部和浙江西南部易损性最低。

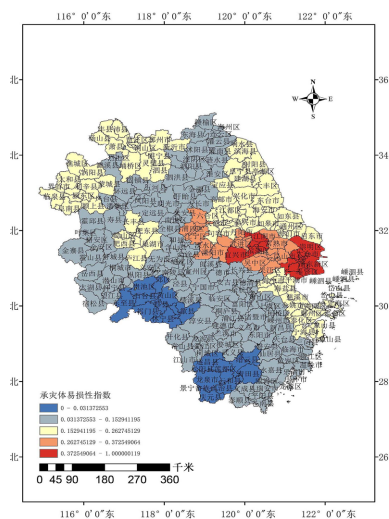


Figure 6. Vulnerability of disaster-bearing bodies

图 6. 承灾体易损性

5.4. 防灾减灾能力

将人均收入、地方财政预算投入和医疗人员数量进行归一化之后, 根据公式(8)进行计算, 得到防灾减灾能力等级结果如图 7 所示。从防灾减灾能力来看, 安徽整体防灾能力最弱, 主要原因是人均收入、地方财政预算投入少, 合肥、南京、无锡、苏州、杭州和宁波防灾能力较高, 防灾能力最强的地区为上海。

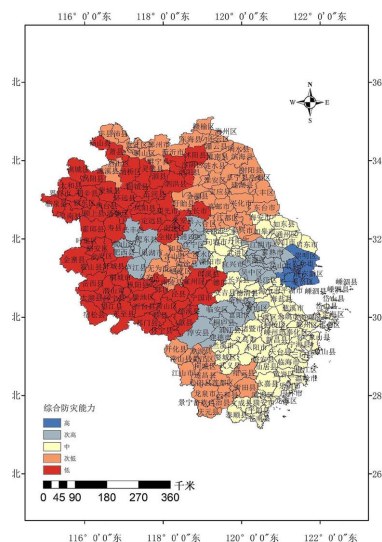


Figure 7. Disaster prevention and mitigation capabilities
图 7. 防灾减灾能力

5.5. 暴雨风险综合评估

将致灾因子, 孕灾环境, 承灾体, 防灾减灾能力四个因素进行归一化处理之后, 按照权重进行计算, 得到长三角地区暴雨灾害综合评估结果, 如图 8 所示。安徽西南部和浙江东南部地区暴雨灾害的风险等级最高, 上海市暴雨灾害风险等级较高。安徽中部、北部和江苏发生暴雨灾害的风险较小。按省份来看, 江苏省是暴雨灾害风险最小的省。

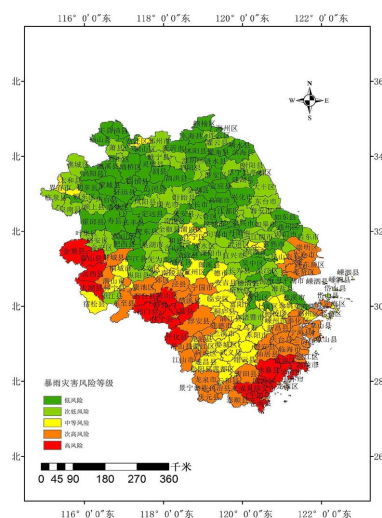


Figure 8. Rainstorm hazard risk levels
图 8. 暴雨灾害风险等级

6. 结论

根据对暴雨洪涝灾害危险性、敏感性、易损性和防灾减灾能力的分析, 可以得出以下结论: 1) 从暴雨洪涝灾害危险性空间分布来看, 安徽西南部和浙江南部地区的危险性最高, 而安徽中部、北部和浙江中部、北部地区的危险性相对较低。这表明了这些地区在暴雨洪涝灾害发生的可能性较大; 2) 从敏感性来看, 浙江除北部以外的大部分地区以及安徽的安庆、黄山地区敏感性较高, 而安徽中部、北部和江苏中部、北部地区的敏感性相对较低。这表明一旦暴雨洪涝灾害发生, 这些敏感性较高的地区更容易受到影响; 3) 从易损性来看, 江苏南部和上海市的易损性最高, 而安徽南部和浙江西南部的易损性最低。这说明在暴雨洪涝灾害发生时, 江苏南部和上海市的人口和财产更容易受到损失; 4) 从防灾减灾能力来看, 从防灾减灾能力来看, 整体上安徽的防灾能力较弱, 应对灾害的能力较弱。而合肥、南京、无锡、苏州、杭州和宁波的防灾能力相对较高, 上海市的防灾能力最强。这表明了这些地区在应对暴雨洪涝灾害方面具有较强的综合应对能力; 5) 综合四个因素来看, 安徽西南部和浙江东南部地区暴雨灾害的风险等级最高, 上海市暴雨灾害风险等级较高。安徽中部、北部和江苏发生暴雨灾害的风险较小。出现这一现象的原因主要是安徽西南部和浙江东南部地区山区多丘陵, 地势复杂, 易发生山洪、泥石流等地质灾害, 暴雨强度大, 防灾能力弱, 暴雨时容易引发灾害。上海作为长三角地区的经济中心和超大城市, 城市化程度最高, 建筑、人口最密集、经济最发达, 在发生暴雨灾害时, 容易发生城市内涝, 损失的程度会更高。

基金项目

国家自然科学基金项目(41905026); 江苏省自然科学基金资助项目(BK20170945); 南京信息工程大学人才启动基金资助项目(2016r028); 江苏省 333 工程高层次人才培养资助(第三层次); 中国博士后科学基金第 63 批面上资助(2018M631554); 江苏省高等教育教改立项研究课题(2023JSJG330)。

参考文献

- [1] 甌炎伦, 吴浩云. 1999 年太湖流域洪水[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2001: 1-10.
- [2] Petak, W.J. and Atkisson, A.A. (1968) Natural Hazards Risk Assessment and Public Policy, Anticipating the Unexpected. Springer, Berlin, 94-96.
- [3] Vojtek, M. and Vojteková, J. (2016) Flood Hazard and Flood Risk Assessment at the Local Spatial Scale: A Case Study. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, **7**, 1973-1992. <https://doi.org/10.1080/19475705.2016.1166874>
- [4] Granier, A., Bréda, N., Biron, P. and Villette, S. (1999) A Lumped Water Balance Model to Evaluate Duration and Intensity of Drought Constraints in Forest Stands. *Ecological Modelling*, **116**, 269-283. [https://doi.org/10.1016/s0304-3800\(98\)00205-1](https://doi.org/10.1016/s0304-3800(98)00205-1)
- [5] Calderon, G., Macias, J.M., Serrat, C., Villegas, C., Blaikie, P., Cannon, T., et al. (1996) At Risk. Natural Hazards, People's Vulnerability and Disasters. *Economic Geography*, **72**, 460-463. <https://doi.org/10.2307/144528>
- [6] 周成虎, 万庆, 黄诗峰, 等. 基于 GIS 的洪水灾害风险区划研究[J]. 地理学报, 2000, 55(1): 15-24.
- [7] 张行南, 罗健, 陈雷, 等. 中国洪水灾害危险程度区划[J]. 水利学报, 2000(3): 1-7.
- [8] 刘小艳, 孙娴, 杜继稳, 等. 气象灾害风险评估研究进展[J]. 江西农业学报, 2009, 21(8): 123-125.
- [9] 于文金, 郝玲. 淮河流域暴雨灾害时空分布及趋势规律研究[J]. 长江流域资源与环境, 2012, 21(3): 315-320.
- [10] 王莹, 张晓月, 张琪, 等. 暴雨灾害风险及其对农业影响的评估[J]. 气象科学, 2019, 39(1): 137-142.
- [11] 樊高峰, 何月, 顾骏强. 基于 GIS 的浙江省暴雨灾害及其危险性评价[J]. 中国农学通报, 2012, 28(32): 293-299.
- [12] 李春梅, 罗晓玲, 刘锦奎, 等. 层次分析法在热带气旋灾害影响评估模式中的应用[J]. 热带气象学报, 2006, 22(3): 223-228.
- [13] 景垠娜. 自然灾害风险评估——以上海浦东新区暴雨洪涝灾害为例[D]: [硕士学位论文]. 上海: 上海师范大学,

2010.

- [14] 朱明月. 江苏省主要气象灾害特征及风险评估研究[D]: [硕士学位论文]. 南京: 南京大学, 2013.
- [15] 杨秋珍, 徐明, 李军. 对气象致灾因子危险度诊断方法的探讨[J]. 气象学报, 2010, 68(2): 277-284.