

俞布, 缪启龙, 潘文卓, 等. 杭州市台风暴雨洪涝灾害风险区划与评价[J]. 气象, 2011, 37(11): 1415-1422.

杭州市台风暴雨洪涝灾害 风险区划与评价^{*1}

俞 布^{1,2} 缪启龙¹ 潘文卓² 宋 健² 张玮玮¹ 段春锋¹

¹ 杭州市气象局, 杭州 310051

² 南京信息工程大学江苏省农业气象重点实验室, 南京 210044

提 要: 根据 1960—2009 年杭州市 7 个县市区台风降水资料, 结合杭州市的社会经济与自然地理要素, 构建一个集致灾因子、孕灾环境、承灾体及防灾能力为一体的区域台风暴雨洪涝灾害风险评价模型。通过 GIS 空间分析技术实现各评价指标的栅格化, 并利用模糊综合评价方法, 编制以 100 m×100 m 栅格为基本评价单元的杭州市台风暴雨洪涝灾害风险区划图。将杭州市域划分为高、次高、中等、次低和低的 5 级风险。区划结果表明: 杭州市台风暴雨洪涝灾害风险从西南至东北呈递增趋势。萧山区、余杭市及杭州主城区等沿海平原区, 风险等级相对较高; 而建德市、淳安县等中西部山地丘陵区, 风险等级略低。

关键词: 台风暴雨, 风险, 区划, 评价

Risk Division and Assessment of Typhoon Rainstorm Flooding Disasters in Hangzhou City

YU Bu^{1,2} MIAO Qilong¹ PAN Wenzhuo² SONG Jian² ZHANG Weiwei¹ DUAN Chunfeng¹

¹ Hangzhou Meteorological Service, Hangzhou 310051

² Jiangsu Key Lab of Agricultural Meteorology, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044

Abstract: Based on the typhoon precipitation data from seven stations in Hangzhou City during the period from 1960 to 2009 and combined with the society economic and natural geographic factors, this study builds a set of typhoon rainstorm flooding disaster assessment model including hazard factors, hazard inducing environment, hazard-affected body and disaster prevention ability. And a map of Hangzhou's typhoon rainstorm flooding disaster risk division was drawn using 100 m × 100 m raster as basic assessment unit, by means of GIS spatial analysis technique for rasterizing evaluation indices and fuzzy comprehensive assessment methods. Finally, the five risk zones of Hangzhou, i. e. higher risk, sub-high risk, medium risk, inferior risk and lower risk, were mapped. Results show that the typhoon rainstorm flooding disaster risk in Hangzhou has an increasing tendency from southwest to northeast. The coastal plain, involved with Xiaoshan District, Yuhang City, main urban area of Hangzhou, and so on, has relative high risk, while the mid-west mountain and hilly area, involved with Jiande City, Chun'an County, and so on, has slightly lower risk.

Key words: typhoon-induced rainstorm, risk, division, assessment

* 杭州市政府财政专项资助

2011 年 1 月 17 日收稿; 2011 年 3 月 15 日收修定稿

第一作者: 俞布, 主要从事气象服务及灾害风险评估研究. Email: fengying5457@163.com

引言

继 0519 号台风麦莎、0716 号台风罗莎先后重创杭州以后,2009 年杭州又遭受台风莫拉克的侵袭,给杭州市工农业生产造成了巨大的损失。随着城市化与台风暴雨次生灾害的交互作用,城市区域潜在社会经济损失被无限放大,给城市防灾、减灾规划与决策方面提出了新的要求^[1-2]。不断发生的台风暴雨灾害表明,完全准确预报和阻止台风暴雨灾害的发生并不现实,但若采用有效的灾害管理战略,则可避免或减轻其带来的巨大损失^[3]。因此,根据影响台风暴雨灾害的发生、发展机制及致灾后果,分析区域台风暴雨灾害风险状况并编制台风暴雨洪涝灾害风险区划,对城市经济持续发展及台风防御规划设计具有重要现实意义,也是城市减灾防灾工作的当务之急。

对于台风灾害风险区划及相应设防标准的研究,各国尚无成熟的经验与成果。美国将墨西哥湾和大西洋沿岸划分为七个区对各区建立了相应的标准设计飓风(Standard Project Hurricane, SPH)和最大可能飓风(Probable Maximum Hurricane, PMH)^[4]。我国学者丁燕等^[5]从致灾因子危险性及承灾体易损性角度,通过概率风险求算对广东省的台风灾害风险进行评估。陈香等^[6]以福建省为例,构建了台风灾害致灾因子、承灾体评价指标体系与模型,并编制了基于行政边界的台风灾害风险区划图。根据目前研究,灾害风险区划的技术和模型大致可以归为灾情统计模型^[7]、概率分布模型以及简单因子叠加模型,一般仅从致灾因子、孕灾环境及承灾体方面分析,尚缺少对防灾能力的考虑,承灾体特征也较为不明确;风险评价对象又多以行政区域为主,致使台风暴雨洪涝灾害形成和扩展的机理性条件被行政区划割裂,且风险评价的精细化程度不够,既增加了防台救灾投入的社会成本和不确定性,又人为地限制了各行政区域间的合作联动效率,从而产生所谓的“防灾死角”,不利于灾害防御规划的设计和防灾救灾工作的开展。

台风暴雨洪涝灾害风险具有多元性及模糊性的特点,它受致灾因子、孕灾环境、承灾体等众多因素影响,而对于多因素的地理信息、遥感信息以及统计信息本身就存在多重性、复杂性、不确定性、不精确性^[8],从机理上定量分析台风暴雨洪涝灾害的成因

及各影响因素间的交互作用现阶段的确较难实现,通过灾害系统理论构建台风暴雨洪涝灾害量化模型仍需深入研究。杭州属亚热带季风气候区,每年夏秋两季极易受西太平洋台风影响。根据杭州市 1951—2009 年台风资料统计,近 59 年共有 88 个台风影响杭州,年均 1.49 个,其中台风中心经过杭州市域个例共有 20 个。全市每年因台风造成的直接经济损失接近 2 亿元,受灾人口超过 15 万,多年累积房屋倒损数量高达 20 万间。本文着眼于台风灾害的成因机制与扩散特征,从危险性、敏感性、易损性和防灾能力四个方面出发,选择与台风暴雨洪涝灾害关联度较大的风险评价指标^[9-11],基于 GIS 技术进行多源、海量栅格数据分析并构建模糊综合评价模型,以 100 m×100 m 栅格为基本评价单元,定量表达杭州市台风暴雨洪涝灾害风险的空间分布格局,以期差别化的区域台风暴雨洪涝灾害防御提供一定的科学依据。

1 数据来源与研究方法

1.1 数据来源与技术路线

研究所需的数据主要包括五类,一是致灾因子台风暴雨的气象资料,最多包括 250 个气象自动站及 171 个水文站的逐日降水,以及 1951—2009 年间主要影响杭州的 88 个西北太平洋热带气旋路径、强度信息。其中杭州、萧山、富阳、临安、桐庐、淳安和建德 7 个国家气象观测站降水资料统一截取为 1960—2009 年,气象及水文自动站降水资料时间范围为 2000—2009 年;二是孕灾环境的自然地理状况的地形、植被、水文及地质资料,其中覆盖杭州市的 1:25 万数字地形高程图(DEM)、杭州市土地利用、行政区划等数字化数据以及 1968—2009 年总共 1907 个滑坡灾情数据均来自于杭州市气象局,2000—2009 年逐月归一化差分植被指数(NDVI)栅格数据源于美国国家地质调查局的免费数据网;三是承灾体的区域人口经济分布统计数据,主要源自 2009 年杭州各县市统计年鉴;四是反映防灾救灾能力的财政收入、医疗保险及人均收入数据。

根据台风暴雨洪涝灾害致灾因子、孕灾环境、承灾体、防灾能力特征选择 14 个风险区划指标,并对指标进行投影转换及空间化处理,得到数学基础一致的 100 m×100 m 栅格要素图层,再运用模糊综

合评价模型对各评价指标进行叠置分析,给出各栅格单元的台风暴雨洪涝灾害风险等级(图 1)。

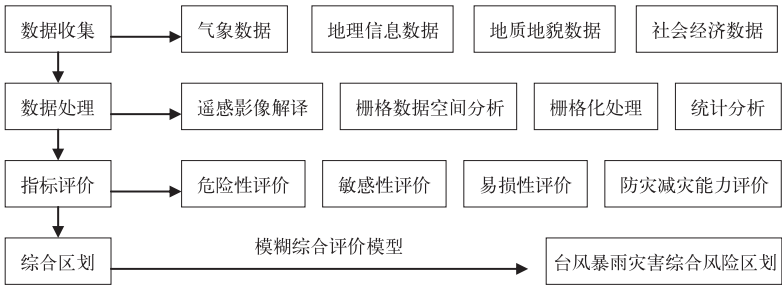


图 1 杭州市台风暴雨洪涝灾害风险区划技术流程
Fig.1 The technical flow chart of typhoon rainstorm flooding risk zonation in Hangzhou

1.2 区划指标与评价模型

1.2.1 致灾因子危险性指标

台风暴雨洪涝灾害致灾因子是表示致使该种灾害形成的触发因素^[12-13]。一般而言,台风暴雨洪涝致灾因子危险性特征主要从台风暴雨洪涝角度分析。根据气象降水强度标准,将 24 小时降雨量为 50 mm 或以上的雨称为暴雨,并且此类降水已经具

备了一定灾损能力及破坏强度。根据对影响杭州市的 88 次台风个例的统计分析,台风影响时间一般持续 2~3 天,且过程中均伴有降水,其中 64 次台风过程出现 50 mm 以上的日降雨量;然而,从台风日最大降雨量与过程降雨总量的对比中发现,日雨量占过程雨量 60% 以上的台风个例高达 74 次。由此可见,影响杭州的台风强降水灾害多以单日台风暴雨为主(图 2)。

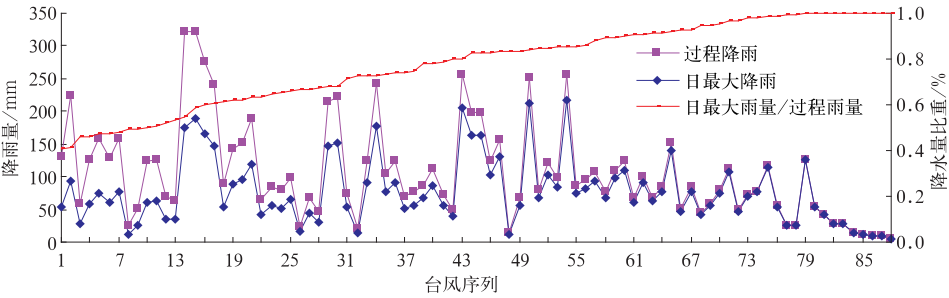


图 2 杭州市台风暴雨洪涝特征分析
Fig.2 The characteristic analyses of typhoon rainstorm flooding risk zonation in Hangzhou

因此,本文选择日最大降雨量来反映影响杭州的台风暴雨洪涝灾害致灾特征。首先对历次台风过程各气象站点的日最大降雨量数据进行信息分配的优化处理,利用直方图方法估计概率分布,并计算日最大降雨量 50 mm 以上台风暴雨强度的超越概率。丁燕等^[5]认为超越概率能较好地反映研究区遭遇台风暴雨强度的可能性,但无法体现台风暴雨的频率特征。因此,本文中的致灾因子强度从超越概率与发生频次两方面给予综合考虑:

$$N_{rain} = P_i \times F_i \tag{1}$$

式中: N_{rain} 为台风暴雨危险指数; P_i 为研究区发生

日最大降雨量 i (mm) 以上的超越概率; F_i 为年均日最大降雨量 i (mm) 以上的发生频次。

表 1 台风暴雨致灾危险性等级

Table 1 The disaster-caused risk ranks of typhoon rainstorm flooding

台风暴雨超越概率	年均台风暴雨频率	台风暴雨危险指数	台风暴雨危险等级
<0.2	<0.5	<0.01	低危险性
0.2~0.3	0.5~1	0.01~0.3	次低危险性
0.3~0.4	1~2	0.3~0.8	中等危险性
0.4~0.5	2~2.5	0.8~1.25	次高危险性
>0.5	>2.5	>1.25	高危险性

运用以上致灾因子强度模型得出日最大降雨量 50 mm 以上的台风暴雨危险指数(表 1),同时将各气象站点的台风暴雨危险指数加载进 ANUSPLIN 模型,并引入以高程作为协变量的三变量局部薄盘光滑样条函数进行空间内插离散,通过指标转换^[14],得到相应的致灾因子危险性图层(图 3)。最后利用 ArcGis 自然断点分级法将各致灾因子的危险程度划分为 5 级。

1.2.2 孕灾环境敏感性指标

孕灾环境包括孕育产生灾害的自然环境和人文环境,是区域环境演变时空分异对自然灾害空间分异程度的贡献^[15]。就影响杭州的台风暴雨洪涝灾害而言,孕灾环境敏感性指标主要选择与暴雨灾害

关联性较大的地理环境要素特征,包括高程(m)、地形标准差、河网密度(km/km²)、植被覆盖度(%)以及地质灾害危险度。

(1)地形因子。所谓水往低处流,因地表径流在重力作用下容易向低洼地汇集,并且由于向低地势区汇集过程中水流有效位能会向动能转化,从而使得水流加速,进而容易衍生地质灾害。同时地形高程越低,地形起伏越小,越容易发生洪水^[16]。本文利用 Arc/info 空间分析模块计算栅格周围 5×5 邻域内 25 个栅格高程的标准差作为表征该处地形起伏程度的定量指标,即从地形标准差、高程两方面综合考虑(见表 2)。

表 2 综合地形因子影响度
Table 2 The influence degree of comprehensive terrain factors

地形高程/m	地形标准差				
	高危险性<0.46	次高危险性 0.46~11.54	中等危险性 11.54~19.38	次低危险性 19.38~28.62	低危险性>28.62
高危险性(2~167)	0.9	0.8	0.7	0.6	0.5
次高危险性(167~354)	0.8	0.7	0.6	0.5	0.4
中等危险性(354~573)	0.7	0.6	0.5	0.4	0.3
次低危险性(573~873)	0.6	0.5	0.4	0.3	0.2
低危险性(873~1657)	0.5	0.4	0.3	0.2	0.1

(2)河网密度。河网的分布在很大程度上决定了评价区域遭受洪水侵袭的难易程度,距离河道、湖泊水库等越近,则发生洪涝的风险越高^[17]。尤其对于蓄洪排涝能力不强的江河水库,短时强降雨过程会导致河水外溢,并向周边发生蔓延、泛滥,因此在对台风灾害的敏感性评价中,河网密度也是不可忽视的重要因素。根据 DEM 提取流域的河网水系分布并将杭州全境划分为 38395 个 1 km×1 km 的网格单元,计算单位格网内河网水系总长度,将各网格单元内的河网水系总长度与网格面积做比值运算,便得到该网格单元内的河网密度。

(3)植被覆盖度。高密度的植被覆盖能有效地缓解台风暴雨洪涝的破坏作用。对台风暴雨洪涝而言,植被覆盖率越大,对洪水的滞留能力越强,则径流系数越小,从而降低下游洪涝发生的可能。本文利用植被覆盖度来反映植被的覆盖状况,考虑到 NDVI 稳定性,对 2000—2009 年 NDVI 数据逐年取最大值再求平均,并根据不同的植被类型转化为植被覆盖度 V^[15]。

$$V = \sum \max(NDVI)/10 \tag{2}$$

(4)地质灾害危险度。台风暴雨常引起山洪暴

发、山体滑坡、泥石流等次生灾害。对于杭州市而言,中西部低山地丘陵区域极易发生类似次生灾害,不仅与台风降水等致灾因子强度密切联系,更与当地的地质条件息息相关。利用杭州市 1968—2009 年已发生的 1907 个地质灾害点的采样信息,采用证据权法^[18-19]分析各影响因子对地质灾害发育的贡献程度,并据此进行地质构造条件及滑坡危险度的定量评价。这些影响因子包括高程、坡度、坡向、沟壑分布、地层岩性、植被指数以及水系分布等。最后,将历史滑坡点与地质灾害危险度区划进行对比、分析,88%的历史滑坡落在中、高危险区内(图 4),即该地质灾害危险度区划结果较为可靠。

1.2.3 承灾体易损性指标

承灾体为各种灾害的作用对象,即人类和其活动所在的社会与各种资源的集合^[20]。承灾体的易损性评价是在对承灾体分类的基础上进行易损等级的划分过程,目的是为区域制定资源开发与减灾规划,防灾抗灾工程建设提供依据。本文选择能够基本反映区域灾损敏感度的人口密度、耕地密度、地均 GDP 以及道路密度因子进行易损性评价。一般人口密度大、产业活动频繁、耕地分布集中、道路分布

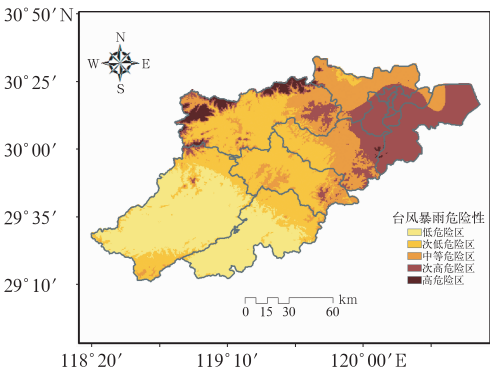


图 3 杭州市台风暴雨洪涝灾害致灾因子危险性分布

Fig. 3 The risk-level distribution of disaster-causing factors of typhoon rainstorm flooding in Hangzhou

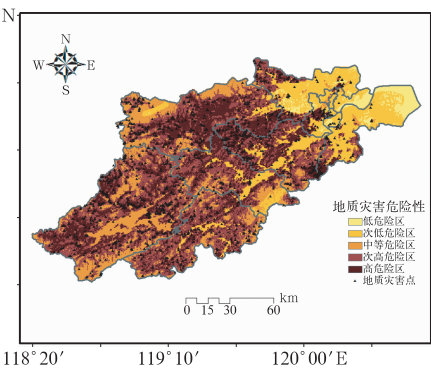


图 4 地质灾害危险度图层

Fig. 4 The risk-level distribution of geological hazards in Hangzhou

密集的区域易损性等级较高。

目前,承载体易损性分析大多以行政区域单元为研究对象,相关数据可直接从统计报表与年鉴中

获得。而这种研究方法往往造成承灾体分布和其他栅格要素图层所依附的空间单元尺度不同,使得数据间融合成为难题^[21]。其次对于承灾体的空间分布特征而言,将其在行政区范围内当作均匀分布来处理,显然与实际情况不相符合,同时也给御灾保障

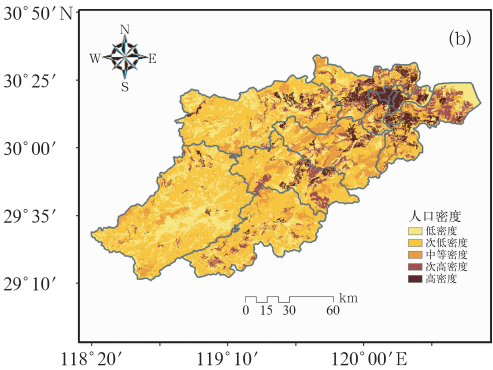
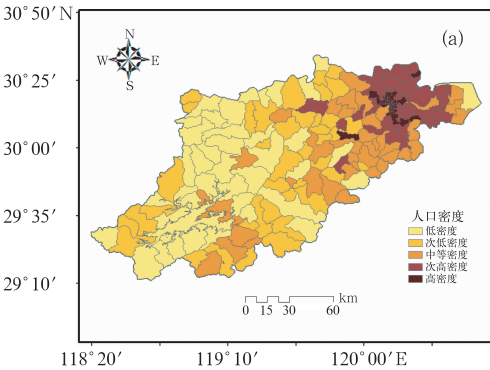


图 5 杭州市人口密度图层

(a) 行政区域人口密度,(b) 空间化人口密度

Fig. 5 The layered chart of population density in Hangzhou

(a) population density of administrative districts, (b) the spatiality of population density

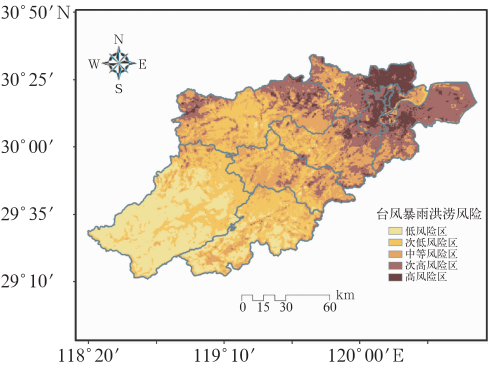


图 6 杭州市台风暴雨洪涝灾害综合风险区划图

Fig. 6 The map of comprehensive risk division for typhoon rainstorm flooding disasters in Hangzhou

和防灾投入造成了不必要的资源浪费。因此本文通过对各承灾体易损性指标做栅格化处理,使之与其他风险评价指标得以有效叠合。

(1)人口密度。采用土地利用、海拔高度、地形坡度及城镇分布作为人口密度的影响因子,以居民地分布作为人口分布的重要指示因子,运用人口密度的统计内插法,建立逐步回归分析模型^[22],并应用多源数据融合技术进行杭州市人口数据的空间化,最终生成的 100 m×100 m 分辨率的栅格人口密度,通过与其行政区域分布相比较发现两者吻合度较高(图 5),从而可由人口密度空间化结果代替人口密度图层参与建模。

$$P_s = C_1A_{s1} + C_2A_{s2} + C_3A_{s3} + C_4A_{s4} + C_5DEM + C_6Slope + \epsilon \tag{3}$$

式中, P_s 为杭州市域各乡镇区域的人口密度, 城镇面积 A_1 , 农村居民用地 A_2 , 农田面积 A_3 , 林地面积 A_4 , DEM 为高程, $Slope$ 为地形坡度, C_1, C_2, C_3, C_4, C_5 和 C_6 分别为相应土地利用类型的回归系数, ϵ 为误差。

(2) 利用杭州市土地利用分布图, 综合分析各种土地利用类型与 GDP 分布的空间互动规律, 选择影响经济发展的关键因素, 建立 GDP 和土地利用格局的关联度模型, 实现在 $1\text{ km} \times 1\text{ km}$ 格网的 GDP 空间定量模拟。

(3) 根据划分后覆盖全杭州的 $1\text{ km} \times 1\text{ km}$ 的格网图层, 利用 GIS 空间叠置分析技术求算单位格网内耕地面积, 并进行栅格化处理, 求得耕地密度分布。道路密度则需要在栅格化之前按照道路等级划分宽度不同的路基缓冲范围, 从而将线状图层转化为面状图层。如高速公路、省级道路、乡村道路缓冲范围分别为 60、40 及 15 m, 进而求算单位格网内道路缓冲范围, 作为反映道路密集程度的易损性因子图层。

1. 2. 4 防灾能力评价指标

过去的灾害风险研究大多将防灾能力归类于承灾体特征, 或者较少考虑。本文认为随着人类对灾害预测和灾害抵御能力的进一步提高, 区域抗灾能力理应在灾害风险评价中扮演举足轻重的地位。例如发布灾害性天气预警, 构筑防洪堤坝, 对建筑结构及抗灾能力的设计, 制定紧急救灾预案, 建立巨灾保险基金, 甚至是类似本文的灾害风险区划等, 都属于抗灾能力的体现^[23]。考虑到许多自然灾害发生发展规律尚不明确, 对承灾体的破坏机理尚不能完全掌握, 以及防灾能力的关键数据不易得到, 或不准确、不全面, 致使无法进行确定的区域抗灾能力评

估。本文仅从统计年鉴中选择能够反映防灾能力特征的基本评价因子, 包括人均收入(元)、财政收入(万元)、医疗及工伤保险参保比重(%)、人均病床位数(%)以及人均医护人员比重(%)指标。

1. 2. 5 模糊综合评价模型

模糊综合评价模型是以模糊变换理论为基础, 以模糊推理为主的定性和定量相结合、精确与非精确相统一的综合分析方法^[24-26], 目前在多指标综合评价中应用较广, 本文利用该模型尝试在台风暴雨洪涝灾害风险区划研究上进行推广。

首先将涉及台风致灾因子、孕灾环境、承灾体及防灾能力方面的 14 个区划指标构成的原始指标集 $\boldsymbol{M} = \{grid_1, grid_2, \cdots, grid_{14}\}$, 即每个指标为单独的栅格图层, 空间分辨率 $100\text{ m} \times 100\text{ m}$; 将每个评价指标图层划分 j 个评语等级, 按照三角形分级函数法确定每个指标的隶属函数 $\boldsymbol{F}_i = \{f_1, f_2, \cdots, f_j\}$, 每一级的子隶属函数为 f_j , 构成栅格图像矩阵, 即模糊关系矩阵 $\boldsymbol{R}$:

$$\boldsymbol{R} = \begin{bmatrix} grid_{11} & grid_{21} & \cdots & grid_{i1} \\ grid_{12} & grid_{22} & \cdots & grid_{i2} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ grid_{1j} & grid_{2j} & \cdots & grid_{ij} \end{bmatrix} \tag{4}$$

然后根据各评价指标的重要性, 应用层次分析法(AHP) 构造因素递阶层次结构, 利用专家经验对各因素重要性进行比较, 从而确定各评价指标的权重 $\overline{\boldsymbol{B}} = [b_1, b_2, \cdots, b_i]$ (表 3), 并通过一次性检验, $CR < 0.1$ 。将模糊权重向量 $\overline{\boldsymbol{B}}$ 与模糊关系矩阵 $\boldsymbol{R}$ 进行合成运算得到模糊综合评价结果向量栅格图像 $\overline{\boldsymbol{A}} = \overline{\boldsymbol{B}} \cdot \boldsymbol{R} = [a_1, a_2, \cdots, a_j]$, 且根据最大隶属度法对模糊综合评价结果向量栅格图像进行叠置分析, 即得到最终的栅格图像, 继而制图输出。

表 3 各评价因子权重分配

Table 3 Weighting coefficients of various assessment factors

致灾因子	权重	孕灾环境	权重	承灾体	权重	防灾能力	权重
暴雨指数	0.1338	地形因子	0.0716	人口密度	0.0780	农民人均收入	0.0601
		河网密度	0.0671	农业用地比重	0.0717	乡镇财政收入	0.0720
		植被覆盖度	0.0614	地均 GDP	0.0669	参保人数	0.0655
		地质条件	0.0697	道路密度	0.0627	病床位数	0.0582
						医护人员数	0.0614

2 台风暴雨洪涝灾害风险区划分析

根据图 6 所示,杭州市台风暴雨洪涝灾害风险整体分布态势从西南内陆区向东北沿海方向递增。东北部平原区为杭州市社会经济重心,人口、经济高度集中,独特的喇叭口地形特征促使其成为台风暴雨多发区,低洼的地势也加大了洪涝灾害风险,因此总体风险等级较高;中部山地丘陵区大多为中等风险等级,而局部地区受地形迎风坡面作用成为台风暴雨中心,从而风险等级相应提高;杭州西部山区受地理分布特征影响,其灾害风险等级较低。

高风险区主要分布在主城区、余杭市、萧山区、富阳市东部及临安东北部一带,土地面积1174.88 km²,占研究区总面积的 7.37%(表 4),而人口数却占杭州市总人口的 33.71%。该区域地处东部沿海,受天目山、午潮山及龙门山三面环围,朝东北方向开口,形成典型的喇叭口地形,有利于水汽、风力的辐合,同时台风气流在西进过程中易产生山前爬坡效应,极大地增加了该地区的降水强度^[27];且靠近台风源地,受台风侵袭频次较高,经常发生台风暴雨等灾害性天气;另外该地区地势平坦、河网密布、地形起伏较小,受短时强降水作用,地表径流容易汇集,城区低洼地容易发生洪水、内涝。此外,该区域为杭州市社会经济发展中心,尤其在主城区周边人口密度大、经济总量高、耕地分布广、交通密集,因此台风暴雨洪涝灾害风险相对较高。而恰是由于该地区经济发达,财政收入高,人口平均受教育程度较高的原因,其基础设施相对完善,城市防灾能力也较强,该区域的部分地区实际风险等级得到相应降低。

杭州市中等台风暴雨洪涝风险集中在中部山地丘陵区,包括富阳市西部、临安市北部、建德市南部、

桐庐县中部以及分水江、富春江等流域范围。该风险区平均海拔较高、地形起伏大,河谷纵横,沿江区域地势多变、地形复杂。由于地表径流在重力作用下容易向低洼地汇集,并且在向低地势区汇集过程中水流有效位能会向动能转化,致使水流加速,因此在下游河谷平原区容易遭遇山洪,在地质层结极不稳定的坡面,容易衍生滑坡、泥石流等次生地质灾害。而杭州中部山地丘陵区具有较为密集的森林覆盖,主要分布在临安市南部、桐庐县北部以及富阳西北部山区。有研究表明^[28],森林植被对陆地水文循环调节作用显著,例如促进降雨再分配、影响土壤水分运动、改变产汇流条件等,进而在一定程度上起到削洪减洪作用。植被覆盖率越大,对洪水的滞留能力越强,降低下游洪涝发生的可能性越大,因而高植被覆盖度区域能够有效地降低台风暴雨洪涝灾害风险。

根据图 5 可知,杭州中部区域承灾体依土地利用类型呈块状区域分布特征,而该区其他地块则主要为自然地貌,人口、经济分布相对稀疏,因此台风暴雨洪涝风险大多呈现中等;而临安市西北部百丈峰、清凉峰一带,以及桐庐县南部龙门山余脉等区域由于迎风坡面对暖湿空气的抬升作用而成为暴雨中心,因此灾害风险为次高等级。

以淳安县、建德市为中心的西部山区台风灾害洪涝风险相对较低,这与深入内陆的台风气流能量被大量损耗,以及高海拔山脉对台风气流的阻隔作用密不可分。该区域位于台风影响边缘区,植被覆盖度高,经济相对欠发达,区划面积为 2971.99 km²,占全市总面积的 18.64%,区域人口仅占总人口数的 4%,加之人口主要集中在基础设施良好的城镇区域,因此实际台风暴雨洪涝灾害风险等级略低。

表 4 杭州市台风暴雨洪涝灾害风险区划面积
Table 4 The risk zonation of typhoon rainstorm flooding disasters in Hangzhou

风险区	高风险区	次高风险区	中等风险区	次低风险区	低风险区
面积/km ²	1174.88	3141.54	4013.55	4640.04	2971.99
比例/%	7.37	19.71	25.18	29.11	18.64

3 结论与讨论

(1)根据影响台风暴雨洪涝灾害形成的因子,构建了台风暴雨洪涝灾害风险评价指标和基于 GIS

多源栅格的模糊综合评价模型,并从致灾因子、孕灾环境、承灾体以及防灾能力 4 方面对杭州市台风暴雨洪涝灾害风险进行分析,从而实现了各种指标的精细描述和定量综合,形成了 100 m×100 m 的风险区划分布图幅。

(2)由于台风暴雨洪涝灾害是复杂的物理过程,影响因素众多,完全定量的反映台风灾害发生发展的机理具有一定困难。本文主要基于历史灾情选择代表性因子,并运用模糊数学的方法进行模糊分析,也是模糊综合评价模型在台风灾害风险评价中的一次探索。

(3)对于台风暴雨导致的洪涝灾害风险,本文仅从几个典型影响因子考虑,缺乏较为完善的机理性模型。为了更精确地反映台风洪涝对杭州中西部山区的影响范围及程度,可以考虑利用水文模型。

致谢:南京信息工程大学应用气象学院杨沈斌博士对本文提供的 ANUSPLIN 气象插值软件,特此致谢。

参考文献

- [1] 刘德辅, 庞亮, 谢波涛, 等. 中国台风灾害区划及设防标准研究[J]. 中国科学 E 辑, 2008, 38(5): 698-707.
- [2] 陈联寿. 热带气象灾害及其研究进展[J]. 气象, 2010, 36(7): 101-110.
- [3] 王军. 基于多源遥感影像的台风灾情动态评估——研究进展[J]. 自然灾害学报, 2008, 3: 23-28.
- [4] Schwerdt R W, Ho F P, Wakins R R. Meteorological criteria for standard project hurricane and probable maximum hurricane wind fields[R]. Gulf and East Coasts of the United States. Silver Spring: NOAA, 1979.
- [5] 丁燕, 史培军. 台风灾害的模糊风险评估模型[J]. 自然灾害学报, 2002, 11(1): 34-3.
- [6] 陈香, 陈静. 福建台风灾害风险分布的初步估计[J]. 自然灾害学报, 2007, 16(3): 18-23.
- [7] 王秀荣, 王维国, 马清云, 等. 台风灾害综合等级评估模型及应用[J]. 气象, 2010, 36(1): 66-71.
- [8] 张永恒, 范广洲. 浙江省台风灾害影响评估模型[J]. 应用气象学报, 2009, 20(6): 772-776.
- [9] 王新洲, 史文中, 王树良, 等. 模糊空间信息处理[M]. 武汉: 武汉大学出版社, 2003.
- [10] 李京, 蒋卫国. 基于 GIS 多源栅格数据的模糊综合评价模型[J]. 中国图象图形学报, 2007, 12(8): 1446-1450.
- [11] 李军玲, 刘忠阳, 邹春辉, 等. 基于 GIS 的河南省洪涝灾害风险评估与区划研究[J]. 气象, 2010, 36(2): 87-92.
- [12] 黄崇福. 自然灾害风险评价理论与实践[M]. 北京: 科学出版社, 2005.
- [13] 仪垂详, 史培军. 自然灾害系统模型: 理论部分[J]. 自然灾害学报, 1995, 4(3): 6-8.
- [14] 刘志红, Li Lingtao, Tim R McVicar, 等. 专用气候数据空间插值软件 ANUSPLIN 及其应用[J]. 气象, 2008, 34(2): 92-100.
- [15] 史培军. 再论灾害研究的理论与实践[J]. 自然灾害学报, 1996, 5(4): 6-17.
- [16] 周成虎, 万庆. 基于 GIS 的洪水灾害风险区划研究[J]. 地理学报, 2000, 55(1): 15-24.
- [17] 陈华丽. 基于 GIS 的区域洪水灾害风险评价[J]. 人民长江, 2003, 34(6): 49-51.
- [18] 谢炳庚, 李晓青. 基于栅格空间信息量化的湖南西部地区生态环境综合评价[J]. 冰川冻土, 2002, 24(4): 438-443.
- [19] 王志旺. 证据权法在滑坡危险度区划研究中的应用[J]. 岩土工程学报, 2007, 29(8): 1268-1273.
- [20] 史培军. 论灾害研究的理论与实践[J]. 南京大学学报(自然科学版), 自然灾害研究专辑, 1991, 11: 37-42.
- [21] 廖顺宝, 孙久林. 基于 GIS 的青藏高原人口统计数据空间化[J]. 地理学报, 2003, 58(1): 25-33.
- [22] 廖顺宝, 李泽辉. 基于人口分布与土地利用关系的人口数据空间化研究[J]. 自然资源学报, 2003, 18(6): 659-665.
- [23] 史培军. 三论灾害研究的理论与实践[J]. 自然灾害学报, 2002, 11(3): 1-9.
- [24] 黄波, 徐冠华, 阎守邕, 等. GIS 中空间模糊叠加模型的设计[J]. 测绘学报, 1996, 25(1): 53-56.
- [25] 虞强源, 刘大有, 王生生, 等. 一种栅格图层的模糊叠置分析模型[J]. 中国图象图形学报, 2004, 9(7): 832-836.
- [26] 蒋卫国, 陈云浩, 李京, 等. 中国北方农牧交错带生态环境的空间格局演变[J]. 自然资源学报, 2005, 20(6): 871-878.
- [27] 潘小凡. 杭州的台风灾害[J]. 浙江气象科技, 1999, 12(5): 28.
- [28] 张志强. 森林植被影响径流形成机制研究进展[J]. 自然资源学报, 2001, 1: 79-83.