

基于历史统计数据的洪水动态地图设计与实现

钟琳颖^{1,2}, 杜毅贤^{1,2}, 徐家鹏^{1,2}, 李 杨^{1,2,3}, 沈 婕^{1,2}

(1. 南京师范大学虚拟地理环境教育部重点实验室, 江苏 南京 210023)

(2. 南京师范大学地理科学学院, 江苏 南京 210023)

(3. 长江三角洲科学数据中心, 江苏 南京 210023)

[摘要] 通过对历史大洪水统计数据的分类和特征分析, 基于洪水发生过程与机理探讨了其在不同时空尺度上对洪水动态地图的要求, 并从动态和相对静态两个方面进行了洪水动态地图设计。最后以长江中下游流域 1998 年特大洪水、1991 年太湖流域洪水的部分指标为例, 设计并实现了相关洪水动态地图。研究结果重现了历史洪灾的发生过程, 展示了洪水发展规律以及灾害损失, 为历史大洪水统计数据的挖掘与应用具有借鉴意义, 也为预防洪水灾害的发生起到警示作用。

[关键词] 历史数据, 大洪水, 统计数据, 动态地图, 信息图表

[中图分类号] P285 **[文献标志码]** A **[文章编号]** 1672-1292(2021)01-0078-07

Design and Implementation of Flood Dynamic Map Based on Historical Statistics

Zhong Linying^{1,2}, Du Yixian^{1,2}, Xu Jiapeng^{1,2}, Li Yang^{1,2,3}, Shen Jie^{1,2}

(1. Key Laboratory of Virtual Geographic Environment, Ministry of Education, Nanjing Normal University, Nanjing 210023, China)

(2. School of Geography, Nanjing Normal University, Nanjing 210023, China)

(3. Yangtze River Delta Science Data Center, Nanjing 210023, China)

Abstract: Based on the classification and characteristic analysis of the statistical data of historical flood, the requirements of dynamic flood map on different space-time scales are discussed on the basis of the occurrence process and mechanism of flood. The design of dynamic flood map is carried out from the dynamic and relative static aspects. Finally, some indexes of 1998 flood and 1991 Taihu flood in the Middle and Lower Reaches of the Yangtze River are taken as examples to design and realize the flood dynamic map. This study vividly recreates the historical flood process and shows the regularity of flood development and disaster loss. It can be used as a reference for the mining and application of historical flood statistics, and it also serves as a warning for preventing the occurrence of flood disasters.

Key words: historical data, the flood, statistical data, dynamic map, infographics

洪水与民生息息相关, 联合国教科文组织在发布的《国际洪水倡议》中指出, 洪水是人类已知的最严重的环境灾难之一。洪水每年在全世界影响到大约 5.2 亿人, 导致多达 25 000 人死亡。中国地处亚洲东部, 季风气候明显、降水年内分配不均, 自古以来水灾频发, 再加上“厄尔尼诺”等气候异常事件, 洪灾形势更加严峻^[1-2]。其中洪水量级大, 雨区笼罩范围广, 洪水灾情严重, 对国民经济有较大影响的具有代表性的洪水称之为历史大洪水^[3]。1998 年, 我国长江流域发生了全流域的特大洪水, 受灾面积 $2.1 \times 10^7 \text{ km}^2$, 约 3 000 人死亡, 造成了约 2 600 亿元的经济损失^[4]。

近年来, 数字历史和历史数据可视化的工作逐渐兴起, 历史学的研究在本质上为叙事—时间—空间的三位一体, 非常适合借助具有时空叙事性的可视化方式进行研究, 因而历史统计数据拥有极大的可视化潜力^[5]。其中最具有代表性的拿破仑东征图, 将空间位置、部队规模、行进方向、气温等多种信息融合, 以极

收稿日期: 2020-09-10.

基金项目: 科技部政府间国际科技创新合作重点专项(2016YFE0131600)、国家自然科学基金项目(41871371)。

通讯作者: 沈婕, 博士, 教授, 研究方向: 面向风险与灾害管理的动态制图、生态文明制图、室内地图设计与制图综合、人文历史叙事地图的设计与实现。E-mail: shenjie@njnu.edu.cn

少的线条表达了极为丰富的历史内涵,使读者能够强烈而直观地感受到战争的残酷性。而历史大洪水作为具有代表性的历史灾害事件,给人类正常生活、生产活动带来的损失和祸患,在给人类历史留下不可磨灭记忆的同时,积累了大量的统计数据资料,而科学合理的可视化有助于直观的记录这段历史,以推动洪水历史数据管理和量化的研究。关于大洪水的可视化研究最早应用于洪水风险图的制作,在制图指南方面,不同国家基于本国实际情况分析了洪水风险图的数据、内容并规范了符号化的标准。在设计与制作方面,国内外学者提出了洪水分析方法^[6]、创建了水利地图数据模型^[7],并开发了洪水风险图绘制系统^[8]以最大程度地实现制图流程化与自动化。但这种可视化成果多是以静态的方式展现,历史大洪水作为一个过程性事件,除了空间信息和属性信息外,还包括时间信息,而传统的静态洪水可视化难以生动地展示其发展与变化过程。因此,近年来的研究开始集中在洪水淹没范围的时空模拟,国内外相继提出了SWMM、InfoworksCS、SLAMM、MOUSE、SSCM等模型以实现城市内涝的过程模拟^[9];文献[10-11]结合了水文学、GIS技术以及遥感技术等,对洪水发生过程实现了三维可视化展示,提升了模型的表达效果及应用价值。随着计算机技术的发展,VR也在洪水灾害场景构建方面开始发挥重要作用^[12]。而洪水作为一个综合性事件,其信息种类多样,不仅局限于淹没范围,众多学者已对洪涝灾害的特征、时空分布以及灾害影响情况进行分析,得到大量的学术成果^[4,13],但这些成果多仍采用静态、传统的可视化方式表达,未能以最直观、最具表现力的方式连续地表达其时空特点,在一定程度上影响了其在公众中的传播。因而本文提出了基于历史统计数据的洪水动态地图设计,它通过分析历史大洪水统计数据的类别和特征,依照现有洪水发生过程与机理分析的研究总结了洪水动态地图在不同时空尺度上的要求,在传统洪水可视化的基础上拓展了时间维度,引入了时空数据分析及动态可视化的方法,将历史大洪水的发展过程和时空变化规律以动态可视化的形式展现出来,进而为历史大洪水的灾情的再现,灾后的损失评估提供更直观的依据。

1 历史大洪水统计数据分析

时空数据可表示地理实体的空间及属性信息随时间的发展与变化,具有空间、属性、时间3个最基本维度^[3]。统计数据也是由空间信息、时间信息和指标信息构成,其中空间信息即统计单元,是统计数据发生的地理空间载体,可对应于时空数据的空间维。时间信息既体现在统计数据的时间跨度上,也表现在不同时间段内的统计指标由于空间、属性信息发生变化,反映在时间序列上的特点,可对应于时空数据的时间维。指标信息是统计数据的类别划分,包括单一的数量指标及该指标下的若干次级指标^[14],主要承载属性信息,可对应于时空数据的属性维。而洪水统计数据作为统计数据的一种,也具有时空数据的特征,本文选择其中具有代表性的历史大洪水统计数据展开讨论。

1.1 历史大洪水统计数据类别

根据中华人民共和国水利部发布的中华人民共和国水利行业标准,历史大洪水信息可分为以下6类,如图1所示。其中,综合信息类描述了与历史大洪水相关的基本信息及灾后对历史大洪水的总结评价;气象信息类描述了造成历史大洪水的气象信息以及相关分析资料;工程运用信息类描述了为减少历史大洪水的发生修建的主要水利工程,例如水库、闸坝等的调度以及相关应用指标等;雨情信息类包含了造成历史大洪水的雨情信息以及相关分析资料;洪灾信息类描述了历史大洪水对水利工程、社会经济的影响情况;水情信息类描述了历史大洪水的发生过程、洪量洪峰情况、水情特征、洪水组成等分析成果;在进行洪水专题图设计时,可以根据信息所属类别选择适当的图表及表达方式。

1.2 历史大洪水统计数据特征

对应于时空数据的空间、时间和属性3个最基本维度,历史大洪水在时空的分布也表现出其空间特征、时间特征及属性特征:

1.2.1 空间特征

空间特征即洪水的空间分布特征。暴雨为我国历史大洪水的主要成因。中国大陆呈阶梯地势,第二阶梯与第三阶梯之间的过渡地带暴雨和洪水频发,重大的洪涝灾害也主要发生在长江流域、珠江流域、黄淮海流域和松辽流域等7大江河流域^[15]。此外,自然、社会等各项因素的差异也会影响洪水灾情。例如经济发达、人口密度大的地区更容易造成较大的洪灾损失。这使得我国的洪水信息呈现出空间分布不均且集中在水域附近的态势。

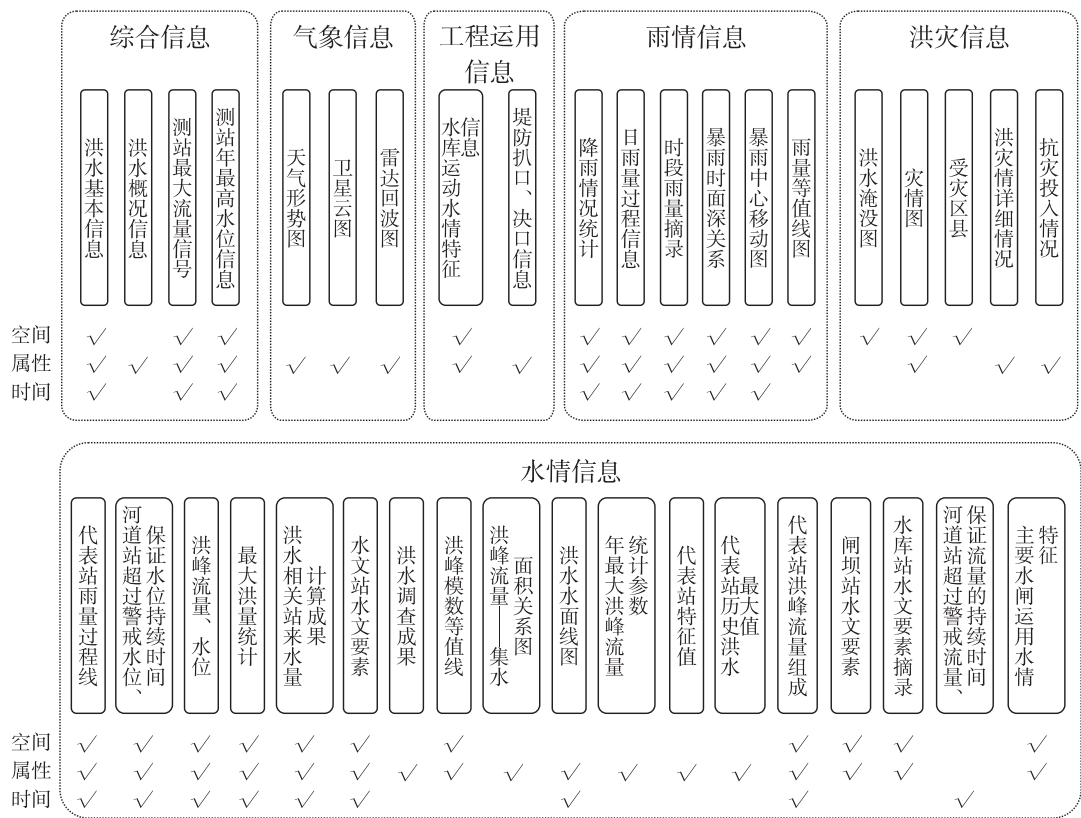


图 1 历史大洪水统计信息分类

Fig. 1 Classification of historical flood statistics

1.2.2 时间特征

时间特征反映了洪水随时间的变化情况,受雨季时间跨度的变化和降雨集中程度的影响,洪水会随季节变化呈现出明显的时间特征:华南地区降水集中在夏、秋两季,雨季较长,是我国洪涝受灾时间最长、次数最多的地区;长江中下游地区洪涝主要集中在夏季的 5—8 月;黄淮海地区和东北地区也多发于夏季的 7—8 月^[16]。此外,许多主要江河发生的特大洪水在暴雨历时、强度特征、中心位置和气象成因上都极为相似。从历史上看,不同类型的暴雨洪水也呈现出地域分布规律^[17],历史大洪水统计信息也在时间上出现重复性变化。

1.2.3 属性特征

属性特征描述了不同指标下洪水统计信息的数量和质量特征,历史大洪水统计信息指标多样,关联信息复杂,我国各流域的水文资料数据虽然众多,但若以制作完整的洪灾图需求,数据质量还不够高。在空间分布上,西部地区和东北地区观测站较少,在时间分布上部分测站观测时间较短且不连续^[18]。

基于以上数据情况,在对历史大洪水统计数据进行可视化的过程中,需要综合考虑其在时间、空间和属性 3 个方面的特征,尽可能多地展现其相关关系。

2 基于灾害发生过程的洪水动态地图要求

在洪灾发生时,洪水的发生可看作小时空尺度上单次的过程性事件,从出现到消亡会随时间不断发生变化,相比于传统的静态可视化方法,动态可视化拥有灵活的表达方式来展现时间维度的信息,以更好地反映洪水事件的发展过程,包括沿线性时间序列单向发展和周期性的规律变化,使用动态可视化可以更直观地表现地理现象的发展和波动等情况,减少了用户自行推理其发展过程的认知负荷,提高了可视化成果的信息传递效率。灾害发生后,需要在大时空尺度上分析历史大洪水统计数据,同一统计单元和不同统计单元在不同时段内的洪水信息构成了一定的时空变化规律,其中主要包括数量变化、成分变化以及频率分布变化^[19],动态可视化可以更好地反映其变化和规律。

对于数量变化,可设计相同的动态符号或者动态图表放置于不同的统计单元内,用来表示不同时间段内、制图区域内不同地区同类洪水指标要素的大小、排名等信息,同时也可以得到同一统计单元内的历次

历史大洪水的数量变化关系.对于成分变化,将传统反映各分量占比的图表转换成动态形式,可以更好地比较不同时间段内、各个统计单元中同一洪水指标要素的构成差异,也可以得到同一统计单元内历次历史大洪水的成分占比变化情况.对于频率分布变化,由于历史大洪水统计数据的数据种类多样,可以统计出洪水指标要素在不同统计单元或者是不同分级范围内的数量分布信息,以表现出统计单元或不同区间段位的频率差异,利用动态可视化可以反映其频率分布对比的变化.

此外,将洪水信息动态化更能够吸引用户注意力,调动读者的认知积极性,通过促进受众对于视觉的感知以及图形结构的理解^[20],加强了对于历史大洪水统计数据细节信息的传递.

3 洪水动态地图设计

相较于传统的静态可视化,动态地图表达的层次更加丰富,但是在其信息负载量加大的同时,也会在认知过程中的产生许多缺陷,主要体现在以下3个方面:

(1)动态可视化含有空间、时间、属性3个变化因素,相比于静态图形、动态图形更容易造成信息过量威胁,对于受众能够快速进行认知反应的需求更高,这就形成了认知负荷^[21].

(2)在读图的过程中,受众的视线更容易受到动态部分的吸引,从而在某一点进行长时间的视觉停留而忽略了其他部分的信息.此外,动态可视化中会存在时间帧,每一帧的信息并不会静态停留,即在后一帧出现时前一帧的内容随即消失,新的信息会取代旧的信息,这增加了对受众瞬时记忆的要求,一旦在某一环路上错过前一帧的信息,就会间断了过程信息的获取.

(3)在数量信息的表达时,静态的可视化方便用户随时进行测度,而动态的图形因为其每一帧的有限视觉停留,加大了对于数据量的判读难度,影响了地图的可量测性.

因此,如何在进行历史大洪水统计数据的动态地图设计时,消除这些可能产生的认知缺陷,更好地反映历史大洪水统计数据,是本文需要探究的重点.

在此次洪水动态地图设计中,所有的可视化成果被划分为两个类别,用来反映时空数据变化的动态部分,包括动态信息图表、动态符号等,和作为基础信息在动态信息间建立索引的相对静态部分,包括注记、色彩等.在洪水动态可视化设计时,应根据历史大洪水统计数据特征和可视化要求,合理的设计动态和静态部分,以更好地反映洪水信息.

3.1 动态部分设计

图表是表达洪水统计数据中属性信息的主要载体,主要用以反映大时空尺度上历史大洪水的时空变化对比关系:

(1)表示数量:在采用传统柱状统计图的基础上,加以分级设色的色彩设计,通过最上层的分级块的色彩帮助用户快速得到数量范围区间,以补充数量的细节信息,如图2所示.此外,考虑到洪水统计数据中部分指标的地区差异显著,需合理进行图表数量色彩等级划分以避免图表失衡,同时在数量极小时做适当夸张处理以防吞没信息.在对数据的精度要求不高时也可采用零钱法进行符号堆积的动态展示,以清晰的展示其数量变化(代表站历史洪水最大值、测站年最高水位信息等数量信息适用于此方法).

(2)表示构成:将普遍占比最大的指标要素确定为固定的起始点,其余部分按数量顺序依次排列,以便在动态展示时判读其变化.洪水统计数据部分指标构成差异显著,数量极少时要适当夸张表示,且应使用饱和度较大的色彩(抗灾投入情况、灾情详情情况等表示各部分构成的数据适用此方法).

(3)表示频率分布:合理选择统计单元,进行频率、频数的统计从而实现历史大洪水统计数据的二次加工,以挖掘出统计数据的更深层信息,在进行此类图表设计时与表示数量的图表同理(降雨情况统计、洪水概况信息等大时间尺度的数据适用于此方法).

(4)表示周期信息:洪水是一个周期性事件,在进行图表设计时也需体现洪水的发展变化周期性规律(代表站雨量过程线、洪水淹没范围等周期性信息适用于此方法).

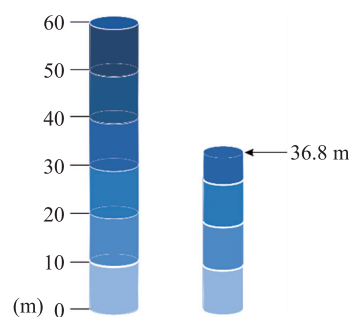


图2 分级柱状统计图

Fig. 2 Hierarchical histogram

洪水动态符号设计即针对点状符号(如测站水位点)、线状符号(如疏散路线)、面状符号(如淹没范围)分别进行连续变化、周期变化、间断变化时的设计,合理地利用发生时长、变化速率、变化次序与变化节奏这几个动态视觉变量^[22]。

在动态符号设计时,发生时长与动画中的“帧”相对应。时长的选择要根据在不同地图信息负载量下人的认知效率来决定。例如,当信息负载量很大时,读者消化每一帧信息的时间随之延长,因而发生时长的适度增加不会造成观感的负担,还同时保证了成图的质量。而当信息负载量较小时则可以适当减少发生时长以避免由于时间拖沓造成的审美疲劳。变化速率的大小对应了符号的变化间隔,反映了过程的快慢变化,在进行动态符号时要正确的处理动态符号的变化间隔,才能发挥动态地图的优势,让读者在感受到变化的基础上还有充分的时间获取到兴趣区域的变化信息,同时也要符合大脑的记忆能力,避免因间隔过长导致用户在读图过程中发生信息间断。时间是有序的,符号的变化次序描述符号变化时每一帧出现的次序,可视化技术以及数据采集技术的实现需要将地理过程离散化。符号的节奏能够表现符号周期性的变化特征,可以描述洪水信息的时态特征及其变化规律。

3.2 相对静态部分设计

洪水动态地图的色彩作为整个可视化成果的相对静态部分,在进行颜色设计时要增加色彩联想以符合洪水主题;在辅助表达数量关系时,由于动态地图的发生时长限制,需增加色彩间的差异性,以保证快速判读,从而更好地获得数量差异信息。对于具有关联性的数据,可采用相近或饱和度相同的颜色,使其处于同一视觉层次以暗示其联动关系。

在多数情况下,注记是动态地图中相对静止的部分,不同帧之间针对的同一对象的注记在无特殊情况下不要随意移动位置以增加认知负担。此外,当注记发生局部变化时还具有读图线索的功能,可以实现不同帧之间的指引,如利用时间轴来指引时间维度的变化,如图 3 所示。



图 3 时间轴索引图

Fig. 3 Timeline index map

4 动态地图的实现

本次实验以长江中下游流域为实验区域,使用长三角科学数据中心的洪灾统计数据库(<http://nnu.geodata.cn:8008>),选取了 1998 年特大洪灾和 1991 年太湖流域洪水这两个具有代表性的历史大洪水的统计数据进行动态可视化,得到了相关成果。

1998 年洪水的观测站水位图反映了 4—7 月长江各代表站月平均水位变化这一小时空尺度下的洪水发展过程,其片段截取如图 4 所示。在动态图可以直观地展示出,4 月长江干流各处水位总体趋势是缓慢下降,5 月是缓慢上升,6 月快速上涨,7,8 两个月则维持在较高水位,9 月的长江干流各处水位缓慢下降至正常水

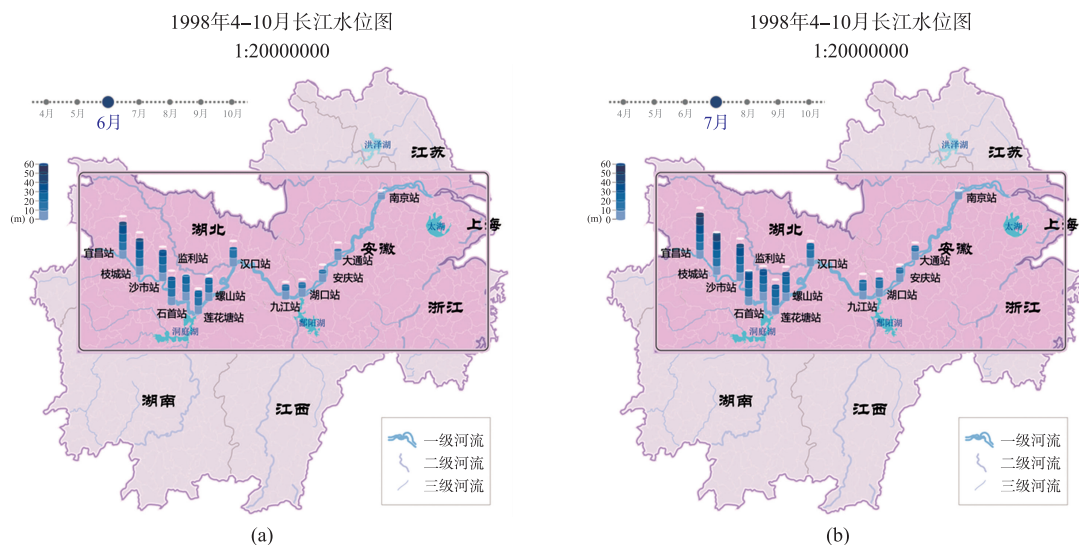


图 4 1998 年大洪水长江现代表站水位图

Fig. 4 Water level map of Yangtze river observatory in 1998

平. 在空间上,长江干流从中游到下游水位总体下降,从下降的速率看,长江水位在石首站经过监利、莲花塘到螺山站一段水位下降较慢. 其中,沙市站、石首站、监利站、莲花塘站所在长江河段又被称为荆江河段,由于该河段所在地区地势低洼,河道弯曲,长江带来的泥沙在此大量沉积,河床已高出两岸平原,极易发生洪涝灾害. 莲花塘至螺山由于地理位置较近,水位下降较少,由于二者都靠近洞庭湖于长江汇流处,在大水年份容易发生洪水遭遇,造成严重洪涝灾害. 九江站与湖口站均靠近鄱阳湖与长江汇流处,也容易发生严重洪水与洪灾. 太湖流域洪涝灾害分布图反映了大时空尺度下太湖流域历史大洪水的时空变化关系,从动态图表、动态符号、色彩和注记等方面进行了洪水动态可视化设计,其片段截取如图 5 所示.

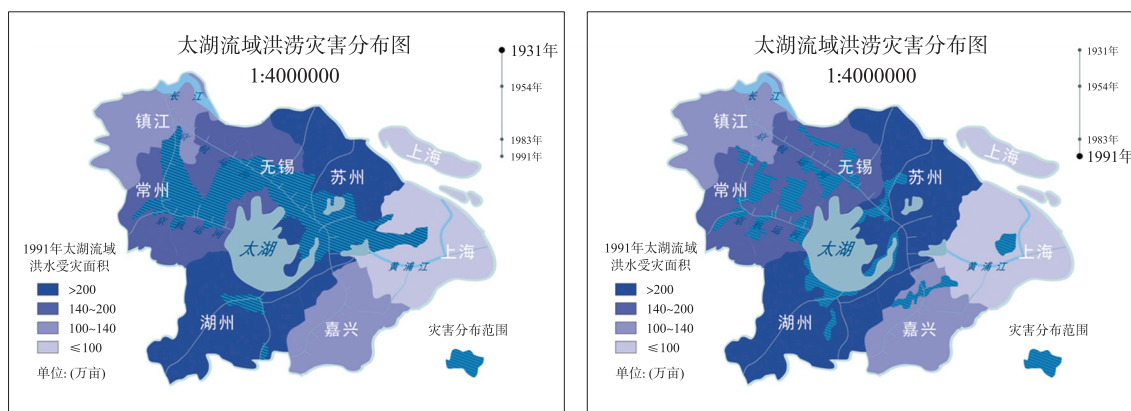


图5 太湖流域洪涝灾害分布图

Fig. 5 Map of flood disaster in Taihu basin

5 结论

本文基于历史大洪水统计数据的洪水动态地图设计,在对历史大洪水统计信息进行分类的基础上,分析了洪水数据的空间特征、属性特征和时间特征,探讨了洪水发生过程机理及其对动态地图的要求,并基于以上特征和要求提出洪水动态信息图表及地图符号的设计方法,将可视化成果在时间上进行连续地展示. 这一研究成果为了解和研究历史大洪水的发生过程、发展规律、特点以及灾害损失提供更加直观的可视化图件. 以更加生动的方式记录并展示了这段历史,更加便于各种用户直观地了解洪水灾害的发生过程与机理,有利于充分发挥洪水灾害历史统计数据的学术价值. 此外,这种动态地图的设计思路与可视化分析方法对洪水灾情及其他灾害的可视化设计有参考价值.

致谢:感谢国家地球系统科学数据共享服务平台-长江三角洲科学数据中心(<http://nnu.geodata.cn:8008>)提供数据支撑.

[参考文献] (References)

- [1] 张琨佳,刘璐,苏筠. 中国清代历史水灾时空特征研究[J]. 自然灾害学报,2015,24(4):104-110.
- [2] 秦年秀,姜彤. 基于 GIS 的长江中下游地区洪灾风险分区及评价[J]. 自然灾害学报,2005,14(5):5-11.
- [3] 郭仁忠. 空间分析[M]. 武汉:武汉测绘科技大学出版社,1997.
- [4] 黄荣辉,徐予红,王鹏飞,等. 1998 年夏长江流域特大洪涝特征及其成因探讨[J]. 气候与环境研究,1998,3(4):300-313.
- [5] 王哲. 历史空间数据可视化与经济史研究——以近代中国粮食市场为例[J]. 中国经济史研究,2017,32(5):28-44,57.
- [6] 丁勇. 河流洪水风险分析及省级洪水风险图研究[D]. 大连:大连理工大学,2010.
- [7] 曹东,金东春. 洪水风险图及其作用[J]. 东北水利水电,1998,16(8):11-13.
- [8] 徐美,刘舒. 洪水风险图制图方法与系统[J]. 中国防汛抗旱,2015,25(4):8-13.
- [9] 章旭. 基于 SWMM 模型的城市内涝模拟与可视化方法研究[D]. 南京:南京师范大学,2019.
- [10] POOLE G C, STANFORD J A, FRISSELL C A, et al. Three-dimensional mapping-plain hydrology and connectivity from aerial photos[J]. Geomorphology, 2002, 48(4):329-347.
- [11] 黄志军,王树文. 基于水文仿真模型与 GIS 的三维可视化在城市洪水演进中的模拟研究——以马鞍山为例[J]. 测绘科学,2010,35(1):88-90,176.

- [12] 胡亚,朱军,李维炼,等. 移动 VR 洪水灾害场景构建优化与交互方法[J]. 测绘学报,2018,47(8):101-110.
- [13] 赖瑞勋,王敏,杨明,等. 二维洪水模型时间序列数据的网络可视化[J]. 地理空间信息,2018,16(12):1056-1059.
- [14] 周平,唐新明,张过. 多时相统计数据空间动态可视化模型研究[J]. 武汉大学学报(信息科学版),2012,37(9):1130-1133.
- [15] 郭跃. 自然灾害社会易损性及其影响因素研究[J]. 灾害学,2010,25(1):84-88.
- [16] 谷洪波,顾剑. 我国重大洪涝灾害的特征、分布及形成机理研究[J]. 山西农业大学学报(社会科学版). 2012,11(11):1164-1169.
- [17] 王家祁,骆承政. 中国暴雨和洪水特性的研究[J]. 水文,2006,35(3):33-36.
- [18] 杜国志,李开杰. 洪水风险图有关问题探析[J]. 中国水利,2006,41(5):34-36.
- [19] 杨达源,闫国年. 自然灾害学[M]. 北京:测绘出版社,1993.
- [20] 艾靖播. 专题数据空间可视化方法在地图服务中的应用[J]. 测绘与空间地理信息,2013,36(9):106-107,113.
- [21] 杨璇. 形成信息可视化动态视觉表征认知负荷的因素和消减手段[J]. 装饰,2017,41(5):114-117.
- [22] 艾廷华. 动态符号与动态地图[J]. 武汉测绘科技大学学报,1998,23(1):47-51.

[责任编辑:陈 庆]