

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2020.06.003

面向流域防洪安全的态势图谱构建及可视化方法

陈 华¹,徐 坚¹,盛 晟¹,刘 峰²,马能武³,朱跃龙⁴

(1. 武汉大学水资源与水电工程科学国家重点实验室,湖北 武汉 430072;
2. 武汉大学计算机学院,湖北 武汉 430072; 3. 长江空间信息技术工程有限公司,湖北 武汉 430010;
4. 河海大学计算机与信息学院,江苏 南京 211100)

摘要: 为充分利用防洪安全领域积累的监测数据,准确理解防洪安全态势,形成科学的综合决策,通过融合态势感知相关理论,提出面向流域防洪安全的态势图谱构建及可视化方法。从时空对象的特征、关系和行为入手,结合态势理论本体方法,针对流域防洪安全问题,厘清了相关的态势感知概念,构建了防洪态势指标体系,提出了态势图谱建模及可视化方法,并介绍了该理论在丹江口库区的应用,对态势感知理论在防洪安全等领域的应用具有借鉴意义。

关键词: 态势感知;流域防洪安全;态势图谱;可视化

中图分类号:TV877; P338 **文献标志码:**A **文章编号:**1000-1980(2020)06-0498-08

Construction and visualization methods of situation map for flood control in river basin

CHEN Hua¹, XU Jian¹, SHENG Sheng¹, LIU Feng², MA Nengwu³, ZHU Yuelong⁴

(1. State Key Laboratory of Water Resources and Hydropower Engineering Science, Wuhan University, Wuhan 430072, China;
2. School of Computer Science, Wuhan University, Wuhan 430072, China;
3. Changjiang Spatial Information Technology Engineering Corporation, Wuhan 430010, China;
4. College of Computer and Information, Hohai University, Nanjing 211100, China)

Abstract: In order to make full use of the accumulated monitoring data in the field of flood control security, accurately understand the situation of flood control security and form a scientific comprehensive decision, the construction and visualization methods of situation map for the flood control security of river basin was proposed. From characteristics, relationships and behaviors of spatial-temporal objects, based on the ontological method of situational theory, this study clarified the concept of relevant situational awareness to built up an indicator system of flood control situation and put forward the trend graph modeling and visualization methods, for the flood control security of river basin. Finally, the proposed methods were applied in the Danjiangkou Reservoir Basin, which has enlightenment and reference significance in the flood control security.

Key words: situation awareness; flood control of basin; situation map; visualization

我国是世界上洪涝灾害最为频繁和严重的国家之一,洪涝灾害对社会经济造成的损失占各类自然灾害的首位。目前各类气象、降雨、水位、历史灾情、卫星遥感等海量数据监测体系已初步形成^[1-3],但数据量过大、种类繁多且关联性不强,无法为防洪决策提供直观有效的信息。因此,如何综合利用海量数据,掌握和理

基金项目: 国家重点研发计划(2018YFC0407904)
作者简介: 陈华(1977—),男,教授,博士,主要从事流域水文模拟、气候变化对水文水资源的影响、水利信息化研究。E-mail: chua@whu.edu.cn
通信作者: 徐坚,博士研究生。E-mail: xujian88@whu.edu.cn
引用本文: 陈华,徐坚,盛晟,等. 面向流域防洪安全的态势图谱构建及可视化方法[J]. 河海大学学报(自然科学版),2020,48(6):498-505.
CHEN Hua, XU Jian, SHENG Sheng, et al. Construction and visualization methods of situation map for flood control in river basin[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences),2020,48(6):498-505.

解防洪安全态势,为综合决策提供科学依据,从而减少洪涝灾害损失,是亟待解决的问题。

态势感知(situation awareness, SA)是指在特定的空间和时间中,对环境各元素或对象的察觉、理解和预测。“态”是指有形的场景实体、事件和环境,需要通过“察觉”获取信息;“势”则是在准确“理解”了“态”的基础上,通过“预测”获取系统的发展方向^[4]。随着态势感知理论的发展,其在军事作战指挥、网络安全管理和电力系统安全管理等领域也形成了较为完善的理论体系且应用广泛。军事作战指挥领域主要包括战场态势评估综述^[5]、态势理解方法^[6]、态势预测方法^[7]、态势可视化^[8-9]等,对于战场形势预估有重要作用。网络空间态势感知是指在网络环境中,对各类要素的获取、理解、可视化,并预测其未来发展趋势的信息技术,具体包括网络安全态势评估综述^[10]、态势理解方法^[11]、态势预测方法^[12-13]、态势可视化^[14]等。

与战场和网络空间类似,流域可以看作复杂开放的系统。结合流域防洪安全要素的时空特征与关系,引入态势感知理论方法,可准确把握防洪安全中各态势要素的性质,形成对未来防洪态势发展的预估,最终满足流域防洪安全管理需求。本文从基本概念、指标构建、图谱建模和可视化等方面对流域防洪安全的态势感知开展研究。

1 流域防洪安全态势感知概念

“态势感知”源于军事需求,最初由 Endsley^[15-17]提出。态势要素是指系统或场景中影响态势变化的时空要素。态势感知过程由察觉、理解和预测三部分组成,察觉主要是指系统获取需要的态势要素,并掌握各要素之间的关系;理解主要是对获取的态势要素的性质和重要性开展综合判断,归纳形成系统独特的理解;预测是指通过理解,形成对未来态势发展变化趋势的估计。

1.1 时空对象特征、关系与行为

从哲学领域来讲,运动是物质的根本属性与存在方式,其具体表现形式是行为与存在^[18]。时空对象的表达内容包括特征、关系和行为,表达如下:

$$O = \{C, R, B\} \tag{1}$$

式中: O ——时空对象本体; C ——时空对象特征,包含空间特征、时间特征、属性特征; R ——时空对象关系,包含空间关系、时间关系、属性关系; B ——时空行为。

行为代表时空对象的动态变化,与态势感知中的“态势”相对应,特征和关系的动态变化分别称为特征行为和关系行为。单独的时空对象本体描述一个系统中个体对象所处的状况,可由一组测度表征。但单一的时空对象本体不能称为态势,系统中所有时空对象本体的集合共同构成态势的概念。数据是传感器产生的未经处理的数据,反映了大自然的观测结果;数据通过有效性处理后形成的数据记录称为信息,是可以被利用的;通过信息,分析时空对象的行为,得到其特征和关系,形成对系统的理解,可形成知识;通过对知识的理解,分析时空对象对系统产生的影响,进行状态评估,即可预测未来。这一映射过程如图 1 所示。

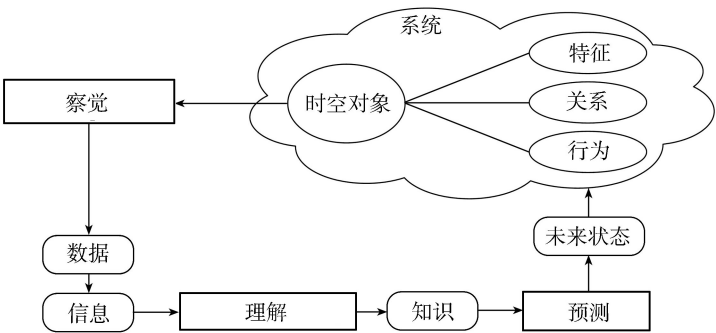


图 1 对象与态势感知的过程映射

Fig.1 Procedure mapping of object and situation awareness

1.2 流域防洪安全态势要素

流域防洪安全系统是开放复杂的巨系统,要素彼此关联,相互制约。其态势要素可初步划分为水文气象、社会环境、应急环境和应急组织 4 类(图 2)。其中水文气象要素对于洪涝灾害来说是致灾因子,是洪涝灾害产生的直接因素;社会环境要素是承灾体,是水文气象要素的作用对象;应急环境要素和应急组织要素

则与应急救灾对应,一个代表环境因素,一个代表人为因素,良好的堤防建设和救灾设施,以及良好的防洪救灾队伍组织都可提高防洪安全性。

2 流域防洪安全态势指标体系

2.1 态势指标体系构建

流域防洪安全态势要素包含水文气象、社会环境、应急环境和应急组织 4 大类,考虑水文气象要素可构建相应的指标体系(图 3):包括雨量、流量、水位以及库容。首先通过态势察觉,基于采集系统中的历史和实时数据,探索观测值的时序变化规律,通过模型训练预报未来多时段数据,再基于矩阵分解算法挖掘水文数据的时空分布特征,进行点-线、线-面等空间转换计算;然后通过态势理解,基于观测数据进行信息挖掘,计算与防洪安全主题密切相关的量值、风险等级、距平百分率等数据,形成态势三级指标;最后通过态势预测,由低级至高级,从站点到流域,由单一到综合逐步计算态势指标,得到一个综合的态势量化值,对应到相应的安全级别,为防洪调度及指挥提供参考。

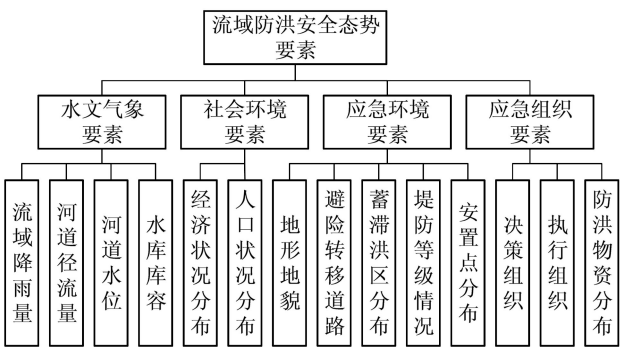


图2 流域防洪安全态势要素
Fig.2 Situation factors of flood control security of river basin

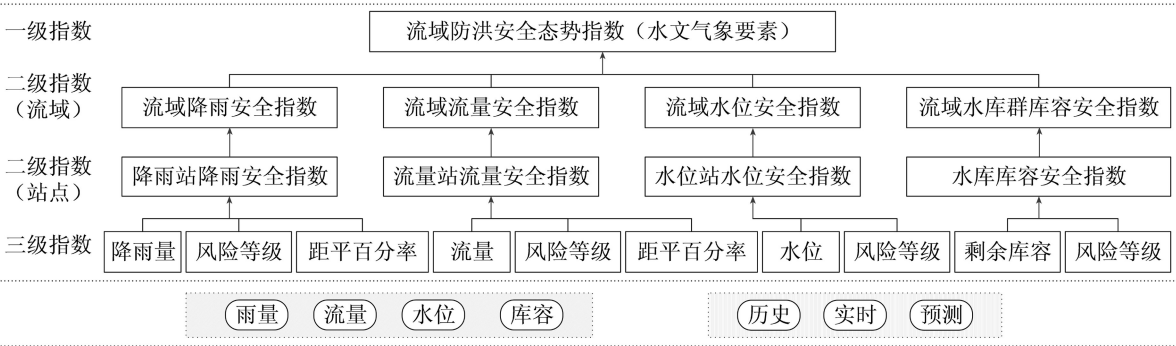


图3 流域防洪安全态势指标体系
Fig.3 Situation indicator system of flood control security for river basin

2.2 态势指数计算方法

基于流域防洪安全态势指标体系结构,按照从低到高的次序,逐层计算态势指数:

$$S_{2Z} = \sum_{k=1}^{n_3} \omega_k S_3 \quad S_{2L} = \sum_{k=1}^{n_2} \lambda_k S_{2Z} \quad S_1 = \sum_{k=1}^{n_1} \xi_k S_{2L} \tag{2}$$

式中: S_3 ——三级指数; S_{2Z} ——站点二级指数; S_{2L} ——流域二级指数; S_1 ——一级指数; ω_k 、 λ_k 、 ξ_k ——三级指标、站点二级指标、流域二级指标对应的权重; n_3 、 n_2 、 n_1 ——各级指数的个数。

一级指数取值[0,10](保留一位小数):0~2.0 优;2.1~4.0 良;4.1~7.5 中;7.6~9.0 差;9.1~10.0 危。

2.3 三级指数的定义

a. 按照量值的大小,划分量值态势指数:

$$S_3 = \begin{cases} 1 & X \leq Q_2 \\ 5 & Q_2 < X \leq Q_3 + 1.5(Q_3 - Q_1) \\ 10 & X > Q_3 + 1.5(Q_3 - Q_1) \end{cases} \tag{3}$$

式中: X ——某时刻的量值; Q_1 、 Q_2 、 Q_3 ——历史值的下四分位数、中分位数和上四分位数。

b. 风险等级态势指数:挑选历史场次洪水数据,绘制 P-Ⅲ 频率曲线。根据 GB/T 22482—2008《水文情报预报规范》^[19]对频率区间和风险等级的划分标准,根据洪水特征值 X 的大小划分风险等级态势指数(表 1)。

c. 距平百分率态势指数 P_a 为

$$P_a = \frac{P - \bar{P}}{\bar{P}} \times 100\% \tag{4}$$

式中： P ——汛期降雨量； $\bar{P}$ ——多年平均同期降雨量。

参照国家标准 GB/T 20481—2006《气象干旱等级》^[20]，根据距平百分率划分态势指数：81% ~ 100% 为 10；71% ~ 80% 为 8；51% ~ 70% 为 6；26% ~ 50% 为 4；0 ~ 25% 为 2。专家广泛打分后，形成权重库，通过构建模糊判断矩阵、去模糊化、层次排序、一致性检验等过程，可对指标权重进行率定，提高权重的准确度。

3 流域防洪安全态势图谱建模

基于时空对象特征、关系和行为，以及态势理论本体的方法，结合 UML 统一建模语言，可构建态势图谱模型。目的是为了形成统一的概念，便于在计算机中统一映射和表达现实世界的态势。

3.1 态势图谱分类

态势图谱是指研究对象某一局部或整体特性，及其时间、空间发展演变规律的图形表达方式，由态势底图叠加感知表现图组成（图 4）^[21]。研究对象的物理特征叠加地理空间信息的图形，称为态势底图，分为：（a）地理信息图，表示研究对象的地理环境；（b）研究对象图，表示研究对象的功能特性、静态特性、资源特性等。

感知表现图包含感应图、感知图和预测图。其中感应图是对研究对象场景的直接反映；感知图是对研究对象场景要素进行分析综合后形成的间接信息；预测图是根据分析后采用某种算法得到未来一段时间的预测值。感知表现图可由多种形式表现，例如二维图表、三维图表、专题地图、动态地图等。

3.2 态势理论本体

Kokar 等^[22]基于本体理论从逻辑上形成了统一的框架，将态势感知的相关概念融入其中，认为人和计算机分别对现实世界有独特的态势感知流程，需要用一套基于本体的理论将二者综合，融入统一框架中，也就有利于将态势感知理论应用于决策支持系统中，提出了态势理论本体（situation theory ontology，STO）的概念，并将涉及的一类和属性予以描述（图 5），形成了抽象的体系。其中核心类为态势类，与态势紧密相关的包括关系类和个体类；个体类指态势感知场景中的对象，关系类定义了个体之间的关系；为了提供一种推断关系的方法，引入规则类；而属性类是态势感知理论中对于对象性质的概括，一个属性可以有一个与之关联的维度，例如空间位置属性可以用（ x,y,z ）这 3 个维度表达；极值类也是数值类的一种特殊化形式。本文将根据这一理论，采用面向对象的设计方法，将防洪安全态势图谱涉及的内容抽象成计算机可以理解的类。

3.3 态势图谱建模

态势图谱建模是利用 UML 语言对态势图谱相关对象的关系和逻辑结构进行关联。在概念层次将态势

表 1 风险等级态势指数划分

Table 1 Classification of eigen value of risk levels

洪水特征值	洪水等级	风险等级	态势指数
$X < F^{-1}(0.20)$	小	低	1
$F^{-1}(0.20) \leq X < F^{-1}(0.05)$	中	中	3
$F^{-1}(0.05) \leq X < F^{-1}(0.02)$	大	高	7
$X \geq F^{-1}(0.02)$	特大	极高	10

注： $F^{-1}(p)$ 为 P-Ⅲ 频率曲线的反函数， p 为频率。

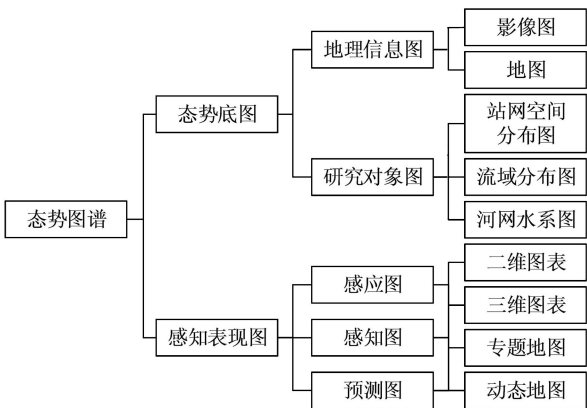


图 4 态势图谱分类

Fig.4 Situation map classification

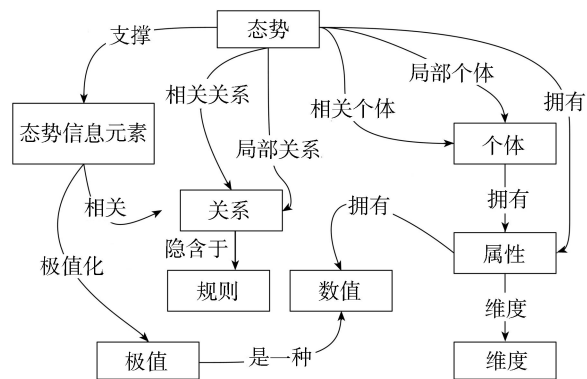


图 5 态势理论本体类和属性

Fig.5 Ontological classes and properties of situation theory

图谱相关建模对象及其关联抽象,将数据流依次从数据源抽取、态势图表达、态势感应、态势感知、态势预测的全过程用UML类图表达。可将各类管理主题、数据、可视化方法、预测算法在同一个面向对象的体系中关联,便于态势模型体系的形成及扩充,以及在计算机中的表达。

将传感器记录的数据通过有效性分析后形成信息,是态势察觉的过程;通过理解形成知识就需要将信息按一定方式组织成为知识。数据是现实世界中时空对象的数字映射,是在计算机中构建态势图模型的基本要素。结合时空本体的概念,数据具有时间、空间和属性3个维度特征。时间类型分为连续型时间(时间段)和离散型时间(时间点),按时间可分为历史态、实时态和未来态。空间类型可分为:(a)场模型(即栅格数据表达的模型);(b)实体模型(即矢量数据表达的模型),实体模型根据空间图形的类型又可分为点、线、面。例如某雨量站的雨量可表达为点,某条河段的平均水位可表达为线,某流域的日平均雨量可表达为面。属性类型和管理主题对应,例如降雨径流管理主题的态势图包含的指标有降雨量、流量、水位等,而水库入库流量主题则包含入库流量、水位等。部分UML模型见图6。

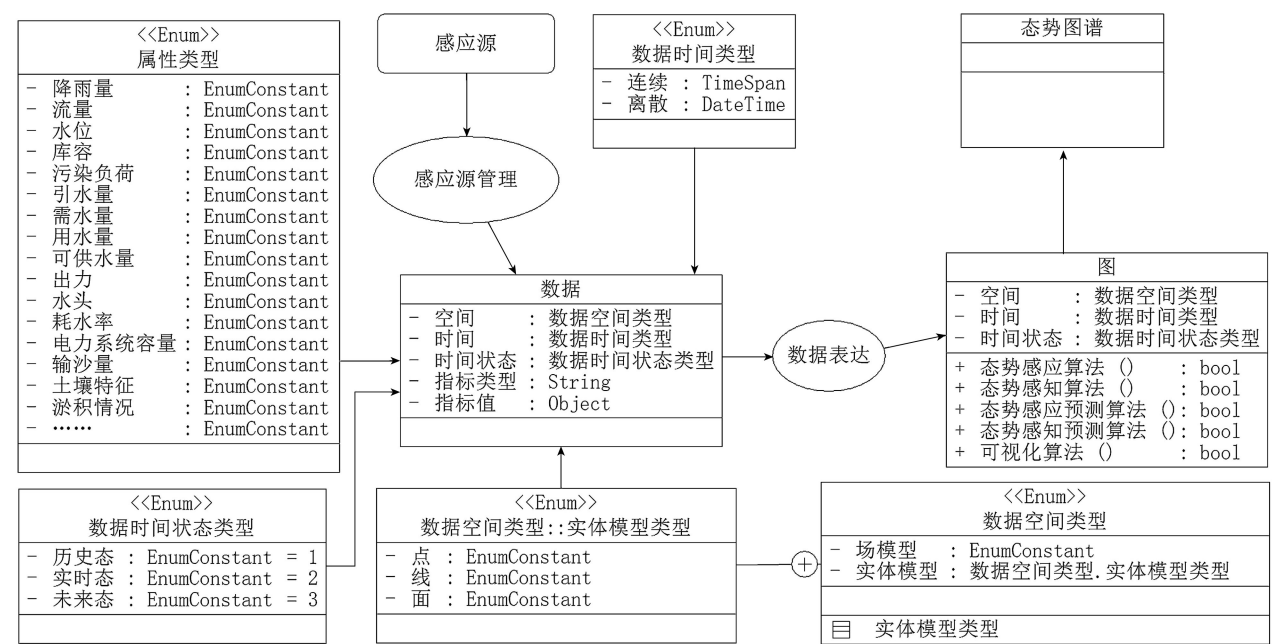


图6 态势图谱UML建模

Fig.6 UML modeling of situation map

4 流域防洪安全态势可视化方法与实例

4.1 态势可视化要素

态势图表达的内容包括特征和关系,其中特征包括时间特征、空间特征和属性特征,关系包括时间关系、空间关系和属性关系。

时间特征分为:(a)时间点,用来表示某一时刻;(b)时间段,用来表示某一时间段,可用起始和终止时间表示,常用来表示某一时间段的平均值。空间特征分为:(a)点,表达现实世界中的点状地理要素,表示为三维坐标(x,y,z);(b)线,表达现实世界中的线状地理要素,表示为三维坐标序列;(c)面,表示现实世界中的面状地理要素,表示为首尾闭合的三维坐标序列。属性特征根据管理主题而定,包括降雨量、流量、水位、库容、污染负荷、引水量、需水量、用水量、可供水量等属性集合中的一个或多个要素组成的子集。

时间维度是线性连续的,因此采用先后顺序表达时间关系。空间关系表达了空间数据之间的约束,常见的空间关系有:(a)拓扑关系:满足拓扑几何学原理的各空间数据间的相互关系;(b)顺序关系:前后、左右、东南西北等;(c)度量关系:表示欧式空间和度量空间上的关系,包含长度、周长、面积、距离等定量的度量关系。属性关系包括:(a)单一属性关系:表示为强弱、大小等;(b)多属性关系:可构建特征空间,采用多维度多层次聚类法提取。

4.2 态势可视化方法

将数据以图形图像的方式表达出来,并提供友好的交互手段,建立人与数据之间的图像通信,借助人们的视觉处理能力观察防洪安全数据中隐含的信息,可进一步提高防洪决策人员感知、分析和理解流域防洪安全现状和预测未来的能力^[16]。对于二维图表,采用常见的折线图、柱状图、饼图、散点图、K线图、雷达图、热力图、关系图等二维图表来表达数据关系,例如用折线图可表达降雨径流关系(图 7 (a));对于三维图表,采用时空立方体、三维散点图等三维图表来表达数据关系,例如用三维散点图可表达降雨中心迁移路径(图 7 (b));对于专题地图,在地理底图上按照地图主题的要求,突出并完善地表示与主题相关的一种或几种要素,可表达数据关系,地图作为底图,每个点位用时间序列柱状图来表达,可同时表达空间、时间和指标关系,例如用热力图叠加在地图上表达降雨分布和转移(图 7 (c));对于动态地图,即是具有动画效果的专题地图,可动态表达数据空间、时间和属性的特征关系(图 7 (d))。

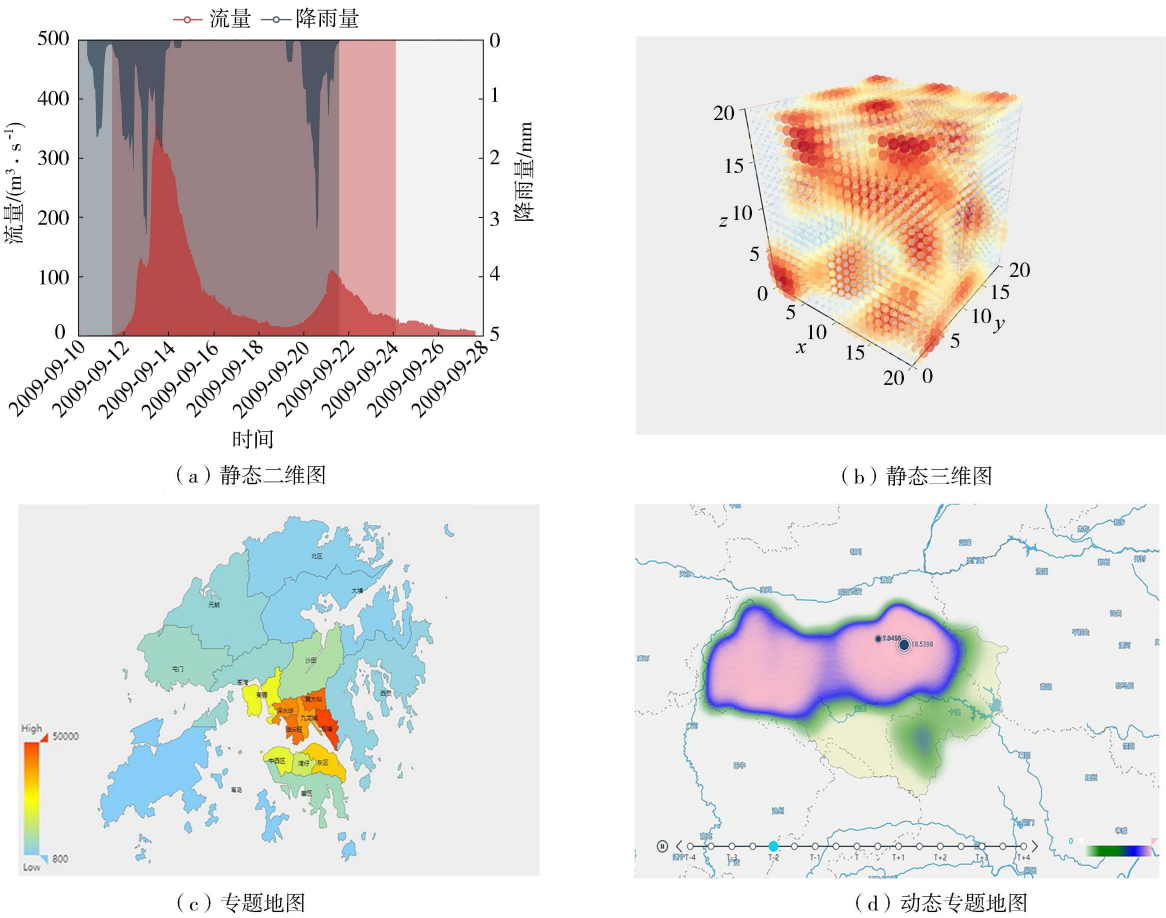


图 7 态势可视化方法

Fig.7 Visualization method of situation map

4.3 态势可视化应用实例

丹江口水库位于汉江中上游,是国家南水北调中线工程水源地、国家一级水源保护区、中国重要的湿地保护区、国家级生态文明示范区,因此丹江口水库流域的防洪安全至关重要。课题组开发了流域防洪安全态势管理平台,包含防洪态势图、水情查询、雨情查询、洪水预报、气象预报等模块,其中防洪态势图模块以动态地图的形式构建丹江口库区防洪安全态势图谱(图 8)。根据防洪安全态势要素,选择了必要的实时监测数据接入;按照态势图谱建模方法设计了类对象,贯穿整个系统从前端到后台的设计;依据态势图谱分类方法设计了地图层,包含态势底图和感知表现图;根据态势指标体系计算了各子流域的防洪安全态势指数,并在地图中表示。系统功能方面,时间轴功能设计为可暂停和自动播放,可查看当前时刻之前一段时间内的实测值和一段时间内的预测值,以及防洪安全态势指标;在信息栏和地图中均可动态表示库区以及各子流域的降雨、流量、水位、库容等防洪安全态势指标。

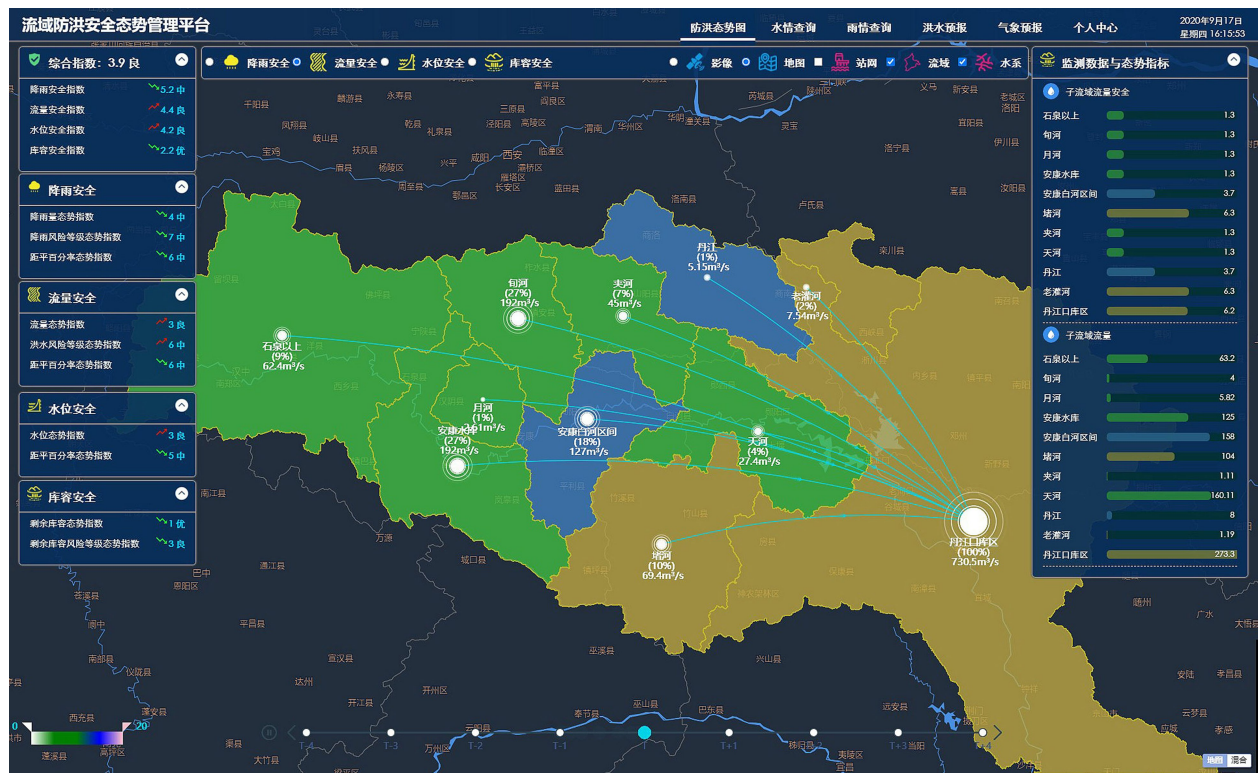


图8 流域防洪安全态势管理平台实例

Fig.8 Situation management platform of flood control security for river basin

5 结 语

基于态势感知的相关理论,本文探讨了其在防洪安全领域应用的可能性,初步探讨了与防洪安全相关的态势要素、态势感知过程、态势指标体系、态势图谱构建、态势可视化等理论方法,并以汉江流域(丹江口以上),构建了防洪安全态势图谱,对态势感知理论在防洪安全等领域的应用具有启发和借鉴意义。未来可围绕以下方面展开研究:

- a. 目前态势指标主要介绍了水文气象要素,未来可将社会环境要素、应急环境要素、应急组织要素等纳入,将流域防洪安全态势指标体系逐步完善。
- b. 通过汇聚更多的防洪安全数据和深度学习算法,采用人工智能、大数据等技术,在态势预测方面开展更多研究。
- c. 本文从态势理论本体展开,描述态势图谱构建的方法,具有一定的普适性,可不局限于防洪安全态势感知,可扩展至水资源利用、水质安全等领域。

参考文献:

[1] RUBINATO M, NICHOLS A, PENG Yong, et al. Urban and river flooding: comparison of flood risk management approaches in the UK and China and an assessment of future knowledge needs[J]. Water Science and Engineering, 2019, 12(4): 274-283.

[2] 陶然,张珂. 基于 PDSI 的 1982—2015 年我国气象干旱特征及时空变化分析[J]. 水资源保护, 2020, 36(5): 50-56. (TAO Ran, ZHANG Ke. PDSI-based analysis of characteristics and spatiotemporal changes of meteorological drought in China from 1982 to 2015[J]. Water Resources Protection, 2020, 36(5): 50-56. (in Chinses))

[3] 张珂,刘林鑫,晁丽君,等. 2000—2014 年云南省陆地生态系统水分利用效率的时空变化[J]. 水资源保护, 2019, 35(5): 1-5. (ZHANG Ke, LIU Linxin, CHAO Lijun, et al. Spatiotemporal variations of terrestrial ecosystem water use efficiency in Yunnan Province from 2000 to 2014[J]. Water Resources Protection, 2019, 35(5): 1-5. (in Chinses))

[4] 鞠恒荣. 面向态势认知的粗糙集决策方法研究[D]. 南京:南京大学, 2019.

[5] 朱丰,胡晓峰. 基于深度学习的战场态势评估综述与研究展望[J]. 军事运筹与系统工程, 2016, 30(3): 22-27. (ZHU Feng, HU Xiaofeng. Summary and research prospect of battlefield situation assessment based on deep learning[J]. Military Operations

Research and Systems Engineering,2016,30(3):22-27. (in Chinses))

[6] 梅发国,戴大伟,张冀. 基于知识图谱的战场目标关系融合技术[J]. 指挥信息系统与技术,2017,8(5):81-86. (MEI Faguo, DAI Dawei, ZHANG Ji. Battlefield target relation fusion technology based on Knowledge mapping[J]. Command Information System and Technology,2017,8(5):81-86. (in Chinses))

[7] 刘伟,伊同亮. 关于军事智能与深度态势感知的几点思考[J]. 军事运筹与系统工程,2019,33(4):66-70. (LIU Wei, YI Tongliang. Some thoughts on military intelligence and deep situational awareness[J]. Military Operations Research and Systems Engineering,2019,33(4):66-70. (in Chinses))

[8] 胡洪波,郭徽东. 通用作战态势图的构成与实现方法[J]. 指挥控制与仿真,2006,28(5):28-32. (HU Hongbo, GUO Weidong. Architecture and techniques of common operational situation picture[J]. Command Control & Simulation,2006,28(5):28-32. (in Chinses))

[9] 仇建伟,王川,程向力. 面向服务的战场态势感知与协同技术研究[J]. 中国电子科学研究院学报,2012,7(2):129-135. (QIU Jianwei, WANG Chuan, CHENG Xiangli. Technical solutions for developing services-oriented battlefield situational awareness and collaboration[J]. Journal of CAEIT,2012,7(2):129-135. (in Chinses))

[10] 龚俭,臧小东,苏琪,等. 网络安全态势感知综述[J]. 软件学报,2017,28(4):1010-1026. (GONG Jian, ZANG Xiaodong, SU Qi, et al. Survey of network security situation awareness[J]. Journal of Software,2017,28(4):1010-1026. (in Chinses))

[11] D' ANIELLO G, LOIA V, ORCIUOLI F. A multi-agent fuzzy consensus model in a situation awareness framework[J]. Applied Soft Computing,2015,30:430-440.

[12] ERBACHER R F, FRINCKE D A, WONG P C, et al. A multiphase network situational awareness cognitive task analysis[J]. Information Visualization,2010,9(3):204-219.

[13] 刘玉岭,冯登国,连一峰,等. 基于时空维度分析的网络安全态势预测方法[J]. 计算机研究与发展,2014,51(8):1681-1694. (LIU Yuling, FENG Dengguo, LIAN Yifeng, et al. Network situation prediction method based on spatial-time dimension analysis[J]. Journal of Computer Research and Dvelopment,2014,51(8):1681-1694. (in Chinses))

[14] 赵颖,樊晓平,周芳芳,等. 网络安全数据可视化综述[J]. 计算机辅助设计与图形学学报,2014,26(5):687-697. (ZHAO Ying, FAN Xiaoping, ZHOU Fangfang, et al. A survey on network security data visualizaiton[J]. Journal of Coputer-Aided Design & Computer Graphics,2014,26(5):687-697. (in Chinses))

[15] ENDSLEY M R. Toward a theory of situation awareness in dynamic systems[J]. Human Factors,1995,37(1):32-64.

[16] ENDSLEY M R. Design and evaluation for situation awareness enhancement[J]. Proceedings of the Human Factors & Ergonomics Society Annual Meeting,1988,32(2):97-101.

[17] ENDSLEY M R. Final reflections: situation awareness models and measue[J]. Journal of Cognitive Engineering and Decision Making,2015,9(1):101-111.

[18] 丁小辉,张树清,陈祥葱,等. 时空对象行为分类与形式化表达[J]. 地球信息科学学报,2017,19(9):1195-1200. (DING Xiaohui, ZHANG Shuqing, CHEN Xiangcong, et al. A study on the classification and formalization of the behavior of spatio-temporal object[J]. Journal of Geo-information Science,2017,19(9):1195-1200. (in Chinses))

[19] 中华人民共和国水利部. 水文情报预报规范:GB/T22482—2008[S]. 北京:中国标准出版社,2008.

[20] 中国气象局. 气象干旱等级:GB/T 20481—2006[S]. 北京:中国标准出版社,2006.

[21] 陈昊. 配电网态势感知与可视化图形与平台的设计与应用[D]. 杭州:杭州电子科技大学,2014.

[22] KOKAR M M, MATHEUS C J, BACLAWSKI K. Ontology-based situation awareness[J]. Information Fusion,2009,10(1):83-98.

(收稿日期:2020 - 09 - 08 编辑:刘晓艳)