

海上救助基地网络关键点选择研究

任玉珍, 吕靖

(大连海事大学交通运输工程学院, 辽宁 大连 116026)

摘要: 为提升海上救助系统的救助效率, 本文利用复杂网络模型, 对事故点和海上救助基地网络中的救助点进行风险值与重要性量化, 并以此为依据对事故点与救助点进行等级划分。由于不同风险等级的事点对救助力量需求存在差异性, 本文根据高风险等级事点对救援匹配高等级救助力量的原则, 提出了一种基于双覆盖标准的关键点选择模型。最后, 以渤海海上救助现状为实例进行分析。

关键词: 网络布局; 复杂网络模型; 双覆盖选址模型; 海上救助基地

中图分类号: U698.2

文献标识码: A

文章编号: 1006—7973 (2020) 07—0085—03

优化应急救助相关设施的选址能有效提升海上救助系统的救助效率。海上救助基地网络关键点选择问题实质上属于应急服务设施选址问题。在该领域中, 现有研究多注重于对救助点的救助能力覆盖面大小、救助点与事故点间的可达性以及救助点选址的经济性展开讨论^[1-5], 但对不同事故点间的差异性需求往往采用同一化处理, 来实现模型构造与计算求解的简化。这与海上救助工作开展的实际情况存在差异, 海上事故的属性多种多样, 同时不同救助点的救助力量配备情况也不尽相同, 若将事故点关于救助力量差异性的需求进行同一化处理, 则可能导致高风险事故得不到相应级别的救援力量的应急救助而延误救助时机。因此, 本文根据高风险值事故点分配高级别救助力量的原则, 提出了一种基于双覆盖标准的关键点选择模型, 并利用实例分析, 验证了该研究方法的有效性与可靠性。

1 海上救助响应复杂网络分析

1.1 海上救助响应复杂网络构成

本文以三元组 $G=(V,E,W)$ 的形式构建了海上救助响应复杂网络。其中, 点集 V 是救助点 S 和事故点 D 的合集 ($V=S \cup D$), 救助点集合表示为 $S_j=(s_1, s_2, \dots, s_n)$, 事故点集合表示为 $D_i=(d_1, d_2, \dots, d_m)$; 边集 E 表示救助点和事故点间的救助响应关系; W 代表每条边上的权重, 由 w_{ij} 表示每条边的具体权值。

覆盖半径 r , 若事故点在某个救助点的覆盖范围中, 则可与该救助点构成救助响应关系, 并进行连线。

海上救助响应复杂网络构成的示意图如下所示:

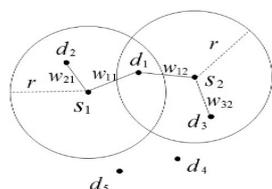


图1 复杂网络构成示意图

1.2 复杂网络结构测度

为确定网络中各边权值 w_{ij} , 根据相关理论研究成果^[6], 构建了如下权值确定式:

$$w = f(P, R) = P \times R = \frac{n}{N} \times R \quad (1)$$

$$R = F \times T \times G \times L \quad (2)$$

式中, P 为事故概率; R 为事故点的风险值; n 为研究海域内该类事故的发生频数; N 为研究海域内总的事故数; F 为事故船舶类型系数; T 为事故船舶规模系数; G 为事故海域系数; L 为事故等级系数。除此以外, 复杂网络的组成部分还包括节点与边。

关于节点, 主要采用点强度从权重关系的角度对含权网络中各救助点的重要性进行衡量。点强度表达式如下:

$$S_{s_j} = \sum_{i \in D_i} w_{ij} \quad (3)$$

关于边, 主要是利用权重分布差异性来对权值分布状况进行衡量, 以判断分析过程中是否有出现某些救助点因为个别高风险值的事点的原因, 导致其在网络中重要性骤然提升, 使整个复杂网络分析结果与实际的事点分布特征不相符。权重分布差异性表达式如下:

$$Y_{s_j} = \sum_{i \in D_i} \left(\frac{w_{ij}}{S_{s_j}} \right)^2 \quad (4)$$

权重分布差异性 Y_{s_j} 实质是与救助点 S_j 相连边的权值分布离散度, Y_{s_j} 的数值越大, 则说明其权值分布离散程度越高, S_{s_j} 受个别高风险值点的影响程度越大, 越容易出现复杂网络分析结果失真的情况。

2 基于双覆盖标准的关键点选择模型

2.1 问题提出及相关假设

本文考虑到具体海上事故的救助需求差异性, 按照高风险等级事故点分配高等级救助力量的原则, 构建了基于双覆盖标准的关键点选择模型。为突出模型的研究目标, 简化计算流程, 故作出如下假设:

(1) 在我国实际的海上救助基地网络布局规划中, 救助点的建设级别主要分为综合基地、基地以及救助站,

其中综合基地数目极少，且与基地相比，除其具有监管作用和进行平时的业务培训功能外，在救助能力上与基地没有实质性差别，则可视其等同于基地，故可将实际规划中的救助力量看作两级划分。参照实际规划中救助点等级划分，故将模型中的救助点集合 S 也主要分为两类，高级救助点集合 S_1 和一般救助点集合 S_2 。

(2) 为满足救助力量分布与事故风险等级分布特征相适应的原则，将研究海域中的事故点集合 D 也分为两类，高风险事故点集合 D_1 和一般风险事故点集合 D_2 。

(3) 考虑到目前我国海上各救助点所配备的救助船舶航速基本一致，且现有规划中对救助范围与救助反应时间有着统一的基本要求，故假设救助点的覆盖半径均相等，且均为 r 。

2.2 模型构建

根据前文的问题描述与条件假设，构建的基于双覆盖标准的关键点选择模型如下：

$$\text{Max } z = \sum_{d_i \in D_1} y_i^1 + \sum_{d_i \in D_2} y_i^2 \quad (5)$$

$$\text{s.t.} \quad \alpha_{ij} = \begin{cases} 1, & l_{ij} \leq r \\ 0, & \text{else} \end{cases} \quad (6)$$

$$\sum_{s_j \in S} \alpha_{ij} \cdot \beta_j \geq 1, \quad \forall d_i \in D \quad (7)$$

$$y_i^1 = \begin{cases} 1, & \sum_{s_j \in S_1} \sum_{d_i \in D_1} \alpha_{ij} \cdot \beta_j \geq 2 \\ 0, & \text{else} \end{cases} \quad (8)$$

$$y_i^2 = \begin{cases} 1, & \sum_{s_j \in S} \sum_{d_i \in D_2} \alpha_{ij} \cdot \beta_j \geq 2 \\ 0, & \text{else} \end{cases} \quad (9)$$

$$\sum_{S_1} \beta_j + \sum_{S_2} \beta_j = k \quad (10)$$

$$i \in D = D_1 \cup D_2, j \in S = S_1 \cup S_2 \quad (11)$$

$$\beta_j \in \{0, 1\} \quad (12)$$

式 (5) 为模型的目标函数，表示各类事故点满足覆盖的要求的数量总和为最大。式 (6) 中， l_{ij} 表示救助点 s_j 与事故点 d_i 间的地理距离，若 l_{ij} 在 s_j 的覆盖半径 r 内，则 α_{ij} 为 1，否则为 0。式 (7) 表示任一事故点 d_i 至少被一个救助点的救助半径所覆盖。式 (8) 表示 D_1 中的高风险事故点被 S_1 中两个以上高级救助点所覆盖的数量。式 (9) 表示 D_2 中的一般风险事故点被 S 中两个及以上救助点所覆盖的数量。式 (10) 表示根据规划目标需要所确定的关键点数目为 k 。式 (11) 为变量范围的约束条件。式 (12) 为决策变量，若救助点 s_j 被选为关键点， β_j 为 1，否则为 0。

关于事故点和救助点的分级，本文决定采用 Fisher 最优分割法对研究节点分级展开研究。因为 Fisher 最优分割法是以样本结构不受损为前提，使其分类的级内离差平方和为最小而级间离差平方和最大的一种聚类分析方法。它能有效地对有序样本或可调整为有序的样本进行客观分级，以确保最终研究结果的真实、可靠^[7]。

3 渤海海上救助实例分析

3.1 渤海海上救助现状分析

目前北海救助局部署在渤海海域的救助基地仅有大连、秦皇岛、天津、烟台等 4 个海上救助基地，将被作为救助点参与本文实例研究。考虑到港口水域具有优良的通航条件，有利于救助资源的储存与调配，在实际海上救助活动中往往会协助救助工作的开展，故在本文的研究过程中，将渤海海域内其他主要港口（包括营口、锦州、葫芦岛、唐山、黄骅、东营、蓬莱、威海、潍坊以及莱州），也作为救助点参与研究，考虑其被进一步的海上救助系统布局规划发展为救助基地或救助点的可能性。

关于事故点的分析，本文收集了北海救助局关于渤海海域 2012–2016 年间所有海上救助工作开展的信息，从中筛选出了救助无果与救助无效（遇险人员罹难）的事故作为事故点参与本文研究。事故点分布情况如下图：

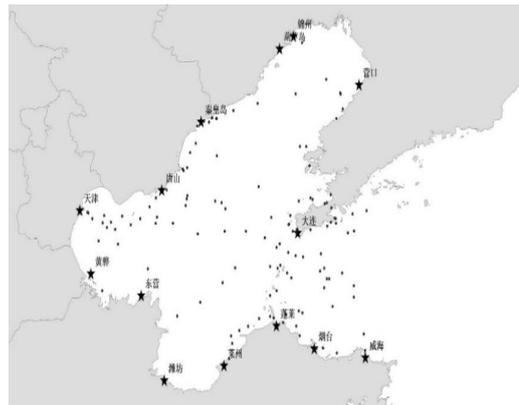


图 2 渤海海域救助失败的事故点分布图

数据来源：北海救助局提供数据

3.2 渤海救助响应复杂网络分析

将救助无效的事故点的相关属性数据代入式 (2)，可得相应事故点的风险值，经统计后将风险值分布情况表示如下：

表 1 事故点风险值统计表

风险值范围	发生频数
>10	2
>5	7
>=1	41
<1	77

由于风险值小于 1 的事故点风险程度低、危险性小且分布面积广，在加强救助点的救助力量部署后，必定会有效降低其发生概率，故本文主要将风险值超过 1 的 50 个事故点作为研究对象。将作为研究对象的事事故点按照风险值降序排列并编号 d_1 至 d_{50} 。

现有相关水上救助系统布局规划明确表示救助点的有效覆盖半径于 2020 年需达到 100 海里，故将选定的事故点与救助点以 100 海里为距离限制来确定两者间的救助响应关系，从而构建出救助响应复杂网络，见图 3。

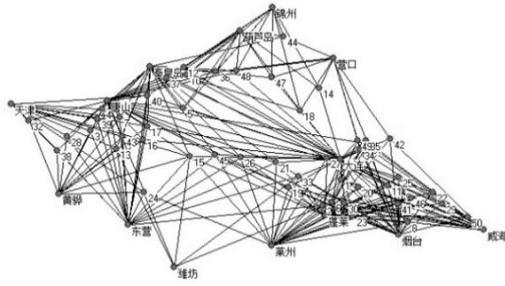


图3 渤海海上救助响应复杂网络

基于构造出的救助响应复杂网络模型,根据式(1)、(3)和(4),即可求得救助点的点强度与权重分布差异性,见表2。

S	S ₁	S ₂	S ₃	S ₄	S ₅	S ₆	S ₇	S ₈	S ₉	S ₁₀	S ₁₁	S ₁₂	S ₁₃	S ₁₄
S _y	42.68	30.39	30.06	28.98	26.09	25.01	23.62	21.17	15.68	14.42	10.84	10.67	9.58	3.72
Y _y	0.03	0.04	0.04	0.04	0.05	0.05	0.05	0.06	0.08	0.08	0.10	0.11	0.11	0.27

表2 关于救助点的复杂网络分析结果

S₁到S₁₄分别为大连、蓬莱、烟台、唐山、秦皇岛、威海、莱州、东营、天津、黄骅、葫芦岛、营口、锦州和潍坊。S_y表示各救助点在复杂网络中的点强度,该指标数值越大,代表该救助点在网络中所处位置越重要。同时,结合各救助点的权重分布差异性指标Y_y,可见各救助点的权值分布离散程度处于较低水平,各救助点覆盖面内的事事故点风险分布特征稳定,表明复杂网络救助点重要性分析结果真实、可靠。

3.3 救助力量部署关键点选择

根据 Fisher 最优分割法可得分级结果:

$$S_1 = \{s_1, s_2, \dots, s_8\}$$

$$S_2 = \{s_9, s_{10}, \dots, s_{14}\}$$

$$D_1 = \{d_1, d_2, \dots, d_9\} \quad D_2 = \{d_{10}, d_{11}, \dots, d_{50}\}$$

将 S₁、S₂、D₁、D₂ 以及各救助点与事故点间的救助响应关系代入双覆盖关键点选择模型(式(5)-(12)),可得所选关键点及其覆盖风险区域情况,见表3:

表3 关键点选择模型计算结果

关键点数量(k)	选中的 S ₁	选中的 S ₂	双覆盖的 D ₁ 数量	双覆盖的 D ₂ 数量	双覆盖的 D 总数
3	1、4、5	-	4	21	25
4	1、2、4、5	-	9	36	45
5	1、2、4、5	9	9	39	48
6	1、2、4、5	9、11	9	41	50

经过计算发现要救助力量对基于历史救助案例甄选出的所有事故点实现全覆盖,至少要选出3个关键点才得以满足该限制,故计算结果中k值最小为3。此时,被选中的关键点包括大连、唐山、秦皇岛,均属于模型设定的高级救助点,对所有事故点的双覆盖率仅为50%,此时覆盖率较低,难以为救助力量部署规划提供决策支持。

当从救助基地网络中选择4个点作为海上救助力量部署关键点时,能以高级救助点双覆盖标准完全覆盖高

风险事故点,同时对所有事故点的双覆盖率可达90%,几近于完全覆盖。此时,被选中的模型设定的高级救助点有大连、蓬莱、唐山、秦皇岛,未有一般救助点入选。当k取值为5时,又新增天津作为救助点,且由于天津救助点的入选,使天津附近的3个风险点也符合被救助力量双覆盖的要求。

当k取值为6时,可实现所有事故点均被符合自身救助需求的救助力量双覆盖。此时,被选中的模型设定的高级救助点有大连、蓬莱、唐山、秦皇岛,一般救助点有天津、葫芦岛。此时的渤海救助基地网络如下图:

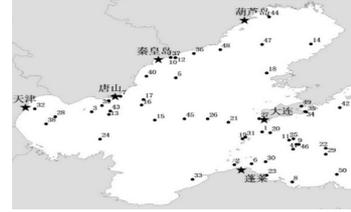


图4 关键点及其所覆盖的事故点(k=6)

4 结论

本文为提升海上救助系统应急救援效率,以渤海海上救助现状为实例展开了研究。研究结果证实,该方法能有效提升海上风险区域救助力量覆盖效率,并为今后的救助力量部署规划提供决策支持。

参考文献:

- [1] 李云斌,刘敬贤,魏蕾,等.渤海海域溢油应急基地多目标优化选址方法[J].哈尔滨工程大学学报,2016,37(4):533-537.
- [2] Berman O, Verter V, Kara B Y. Designing emergency response networks for hazardous materials transportation[J]. Computers & operations research, 2007, 34(5):1374-1388.
- [3] Salman F S, Yücel E. Emergency facility location under random network damage: Insights from the Istanbul case[J]. Computers & Operations Research, 2015, 62(C):266-281.
- [4] Caunhye A M, Zhang Y, Li M, et al. A location-routing model for prepositioning and distributing emergency supplies[J]. Transportation Research Part E Logistics & Transportation Review, 2016, 90(43):161-176.
- [5] Sun H L, Zhou Z J, Xue Y F. Emergency Location-routing Problem with Uncertain Demand under Path Risk[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2013, 47(6):962-966.
- [6] 吴兆麟,朱军.海上交通工程[M].大连:大连海事大学出版社,2004:291-292.
- [7] 张继权,崔亮,佟志军,等.基于格网GIS与最优分割法的呼伦贝尔草原火灾风险预警阈值研究[J].系统工程理论与实践,2013,33(3):770-775.