

# 公路网灾害应急救援点多目标选址模型及算法

杨金顺, 孙洪运, 李林波, 吴 兵

(同济大学 道路与交通工程教育部重点实验室, 上海 201804)

**摘要:** 从公路自然灾害应急救援点的功能需求、选址影响因素、选址要素(顾客、设施、空间、度量)和选址目标等方面对救援点选址规划特征进行了研究。从公路应急救援的快速反应、集合覆盖、灾害损失最小化 3 个方面建立了公路网应急救援点的多目标选址优化模型, 并探讨了模型的求解算法和求解步骤, 通过 Lingo 软件编程实现了优化目标的求解。最后, 通过浙江桐庐公路网的应急救援点规划实例对提出的选址优化模型进行了应用。

**关键词:** 公路网; 选址规划; 多目标决策; 应急救援点; 自然灾害

**中图分类号:** U491.12

**文献标志码:** A

## Multi-objectives Location Planning Model and Solution Algorithm for Disasters Rescue Site of Highway Network

YANG Jinshun, SUN Hongyun, LI Linbo, WU Bing

(Key Laboratory of Road and Traffic Engineering of the Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 201804, China)

**Abstract:** The characteristics of highway emergency rescue site location planning were first analyzed from four aspects including the functional requirement, location impact factors, location elements (customers, facilities, space and measurement) and location objectives of emergency rescue site. Based on three objectives in rapid response, set covering and disaster loss minimum, a multi-objectives decision model for location optimization was established. Then the algorithm and procedures of this model were discussed and the optimized objective was achieved through the Lingo programming. Finally, the method of rescue site planning was applied to the Tonglu highway network in Zhejiang Province.

**Key words:** highway network; location planning; multi-objectives decision; emergency rescue site; natural disasters

之一, 灾害种类多、强度大、发生频率高、损失严重。频发的自然灾害对公路交通造成了严重影响, 也对公路设施的灾害应急救援提出了更高要求。目前我国公路的应急救援工作主要依靠公路养护站完成, 但这些养护站点的规划布设多注重于日常管理养护, 缺少灾害应急管理方面的考虑, 特别是在应急响应、救援效率、抗灾资源配置和救灾机制协调等环节难以满足应急救援要求。鉴于此, 需针对自然灾害开展区域公路网应急救援点布设研究, 以建立适应应急管理的救援点网络, 加强灾后救援、救援物资调动等方面的应急能力, 提高公路管理的应急救援水平。

公路网应急救援点规划的核心问题是救援点选址, 国内外学者在选址问题方面已开展了大量研究, 特别是城市应急服务设施(消防站、医疗急救站等)选址问题是研究重点。传统应急服务设施选址模型主要有绝对中心点模型<sup>[1]</sup>、中值模型<sup>[2]</sup>、集合覆盖模型、最大覆盖模型<sup>[3-4]</sup>、广义最大覆盖模型等。传统选址模型有效解决了选址中的主要问题, 但多关注于选址的某一方面, 具有一定的局限性。

在传统应急设施选址模型的基础上, 国内外学者针对不同的实际情况进行了优化。1994 年 Vladimir 等在传统的确定性集合覆盖模型基础上, 考虑服务设施经常处于服务状态的情况, 提出了随机性集合覆盖模型<sup>[5]</sup>。Suleyman 等在 1998 年指出应急管理是复杂的多目标优化问题, 在应急资源限制下必须解决应急资源的折中利用问题<sup>[6]</sup>。Masood 等在 1998 年建立了消防站选址的多目标数学模型, 该模型不但考虑了传统选址模型的时间和距离目标, 而且还考虑到了与费用相关的目标<sup>[7]</sup>。Wlodzimierz 等综合考虑了中心点和中位点目标函数的应急设施选址双目标模型<sup>[8]</sup>。Sydney 等在 2000 年提出了香港医院的选址及其资源配置模型的框架, 包括新医院地址的选择以及旧医院地址的重新

我国是世界上受自然灾害影响最为严重的国家

收稿日期: 2012-12-06

第一作者: 杨金顺(1979—), 男, 博士生, 主要研究方向为交通运输规划。E-mail: jinshun2006@126.com

通讯作者: 孙洪运(1985—), 男, 博士生, 主要研究方向为交通运输规划与管理。E-mail: shy1985tj@163.com

分布,新医院床位数量的设置以及旧医院床位数量的重新设置<sup>[9]</sup>.何建敏等在传统模型的基础上,分析了不同条件下的应急服务点选址、应急资源配置和应急资源调度等问题的模型和算法<sup>[10]</sup>.以上优化模型以传统选址模型为基础,考虑城市消防站、医院等应急设施选址的实际问题,建立改进的选址模型并予以求解,这些研究思路与方法为公路灾害应急救援点选址规划提供了有益借鉴.

在公路应急救援领域,研究的重点多为公路事故救援方面,对公路事故救援的路径选择及医疗设施分布模型进行研究<sup>[11-13]</sup>,而少有针对公路自然灾害及受灾路段抢险救援开展应急救援设施的选址模型研究.

综上所述,国内外在公路网自然灾害应急救援点的选址规划方面并未见全面深入研究,而我国公路事业的建设发展迫切需要解决这一实际问题.本文从公路应急救援点功能需求、选址影响因素、选址要素和选址目标等方面对公路网在自然灾害条件下的应急救援特征进行分析,根据公路应急救援的实际要求建立合适的救援点选址优化模型,并对模型的求解方法和步骤进行讨论,为构建区域公路网自然灾害应急救援点网络提供决策支持.

## 1 公路网灾害应急救援点选址特征

### 1.1 应急救援点功能需求

自然灾害的发生,会造成公路设施的损坏,甚至导致地区对外交通的中断,形成救援孤岛.保障公路自身设施的抗灾能力和地区节点间的通达性是公路网自然灾害应急救援的两个基本要求.对公路受灾路段快速恢复是以上两个应急管理层次的关键,也是应急救援点布置规划时的首要目标.

公路网自然灾害应急救援点是为应对自然灾害对公路交通和基础设施的破坏,在公路网范围内设置的拥有一定数量救援人员及设备的公路服务场所.其主要功能是在公路灾害发生后,救援人员及所需救灾设备能在尽可能少的时间内到达灾害现场抢险救灾,以有效保证公路交通的通达和安全,并全面做好灾后恢复工作.公路应急救援点布置的主要功能要求如表 1 所示.

### 1.2 选址影响因素

公路网应急救援点的选址需要综合考虑多方面的影响因素,主要有道路交通、道路环境、道路管理及社会经济等 4 方面因素(如图 1 所示).在建立救援点选址模型时对各因素综合进行定性和定量分

析,将复杂因素抽象为数学语言,建立目标函数以及约束条件,进行求解.

表 1 应急救援点功能需求  
Tab.1 The required functions of emergency rescue site

功能需求	具体要求
时间紧迫性	保证在公路灾情发生后,一定时间内到达现场处置
空间全覆盖	全面覆盖整个路网,避免出现救援盲区
成本最小化	突出站点布设规模与布设利用率的最优平衡,避免产生冗余站点,最大限度减少站点建设投入以及后期运营费用
服务差异性	充分考虑公路灾害种类、强度的区域差异性,针对不同区域的灾害特点,布设具有不同功能的应急救援点,有区别地配备救援资源
协调高效性	强调站点间的合作,便于灾后应急资源的相互利用;分工主次明确,合理分担救援任务

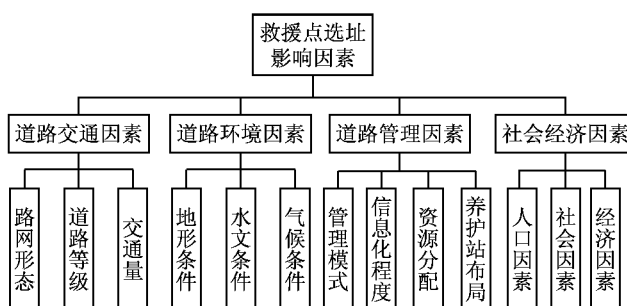


图 1 应急救援点选址影响因素图

Fig.1 Influencing factors of emergency rescue site

### 1.3 选址要素

选址问题具有 4 个基本要素<sup>[10]</sup>:空间、顾客、设施和度量(顾客和设施之间距离或时间).公路网应急救援点的选址规划,空间为区域公路网络,顾客是需要救助的灾害路段( $F_j$ ),设施是配备公路抗灾人员、抢险物资、救援车辆等人员设备的应急救援点( $S_i$ ),度量为设置权重的距离或行程时间( $t_k$ ),如图 2 所示.

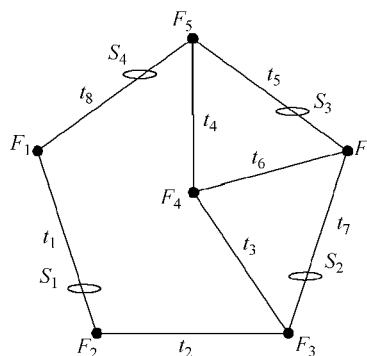


图 2 应急救援点选址规划要素示意图

Fig.2 Location planning elements of emergency rescue sites

救援点选址中的空间主要为区域公路网络空

间,同时要考虑人类居住的城市和乡镇村庄的分布空间,不同气候气象条件的大气空间等。

灾害路段的选取与很多因素有关,主要根据历史灾害统计资料,绘制区域公路网灾害分布图,在此基础上选取灾害路段作为选址规划的顾客。综合考虑灾害分布、灾害类型、灾害强度、灾害频率、灾害区域人口与经济因素、公路等级、养护管理水平等因素,得到公路灾害路段,并确定灾害区段的权值。

公路应急救援备选点可以通过两种方法确定,一为现有的公路养护站,二为根据区域的实际灾害情况选出的备选点。备选救援点的布设原则是在现有风险等级路网结构上,保证灾害发生后,抢险人员和救援物资能及时到达高风险灾害事发点,且在固定投资资金的约束下,尽可能实现救援点的空间全覆盖。鉴于公路网的实际情况及公路应急救援设施的特点,备选点最好设置在乡镇政府驻地,便于应急救援人员和设备的配备供给。

度量用顾客和设施之间的行程时间表示。公路网中公路等级不同,其设计车速不同,同时要考虑不同灾害条件下的实际行驶速度,根据历史经验,按公路交通气象的种类和强度等级,对设计速度进行折减,计算灾后应急救援的实际行程时间。

#### 1.4 选址目标

应急救援点选址的决策目标主要有成本最小化、需求导向、效益最大化等,这些目标可能存在冲突,需要应用多目标优化理论与方法解决选址目标决策问题。针对公路网自然灾害应急救援点选址问题,应根据公路灾害救援的实际需要对选址进行全面考虑,建立适宜的决策目标。首先应该满足应急救援的时间紧迫性要求,保证应急救援需求点的加权最大距离最小;其次保证应急救援点覆盖所有需求区域,并使救援点总的建设成本最小;再次考虑各个救援点之间的相互协作,尽可能多的救援队参与需求点救援,保证应急救援需求点的超额覆盖最大,使灾害路段的损失最小。

## 2 选址优化模型

根据上述公路网自然灾害应急救援点特征研究,建立针对该问题的救援点选址优化模型。以区域公路网为研究对象,假设  $S = \{S_1, S_2, \dots, S_m\}$  为公路应急救援点集,  $S_i (i=1, 2, \dots, m)$  为待选的公路应急救援点,  $F = \{F_1, F_2, \dots, F_n\}$  为公路灾害发生路段集,  $F_j (j=1, 2, \dots, n)$  为公路灾害发生路段。  $t_{ij} (i=1,$

$2, \dots, m, j=1, 2, \dots, n)$  表示从应急救援点  $S_i$  到公路灾害地点  $F_j$  的最短行程时间,  $T_i$  为决策者设定的救援点到达灾害路段的最短时间要求限制,预先设定的应急救援点数目为  $p$ 。假设待选应急救援点集和公路灾害路段集为有限集,且  $t_{ij}$  是已知的。

区域公路网自然灾害应急救援点选址的多目标决策模型为

$$\min V_1 = L \quad (1)$$

$$\min V_2 = \sum_{i=1}^m c_i y_i \quad (2)$$

$$\min V_3 = \sum_{j=1}^n \omega_j K_j \left[ 1 - \frac{\sum_{i=1}^m x_{ij}}{Q_j} \right] \quad (3)$$

$$\text{s. t. } \sum_{i=1}^m y_i = p \quad (4)$$

$$\sum_{i=1}^m \omega_j t_{ij} x_{ij} \leq q_j L, j = 1, 2, \dots, n \quad (5)$$

$$q_j \leq \sum_{i=1}^m x_{ij} \leq Q_j, j = 1, 2, \dots, n \quad (6)$$

$$x_{ij} t_{ij} \leq T_i \quad (7)$$

$$x_{ij} \leq y_i$$

$$i = 1, 2, \dots, m, j = 1, 2, \dots, n$$

式中:

$$x_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{满足 } T_i \text{ 要求的救援点 } S_i \text{ 参加} \\ & \text{公路灾害路段 } F_j \text{ 的救援} \\ 0, & \text{其他} \end{cases}$$

$$i = 1, 2, \dots, m, j = 1, 2, \dots, n$$

$$y_i = \begin{cases} 1, & \text{设立救援点, } i = 1, 2, \dots, m \\ 0, & \text{其他,} \end{cases}$$

$V_1, V_2, V_3$  为目标函数;  $L$  为应急救援点服务需求区域的加权最大距离;  $c_i$  为  $S_i$  点建设应急救援点成本;  $\omega_j$  为灾害路段  $F_j$  的相对权值;  $K_j$  为灾害路段  $F_j$  在无救援队到达情况下的灾害损失;  $q_j$  为灾害路段  $F_j$  需要的最少救援点数量;  $Q_j$  为灾害路段  $F_j$  容纳的最多救援点数量。

模型说明如下:

目标函数式(1)和约束条件式(5)使应急救援点服务需求区域的加权最大距离  $L$  为最小( $p$  中心模型),保证应急救援的快速反应;

目标函数式(2)为各个救援点建设成本累加和,同约束条件式(6)保证救援点总建设成本最小(集合覆盖模型);

目标函数式(3)为各个灾害路段的损失累加和,保证公路灾害损失最小,假设每个灾害路段的损失与在规定服务时间限制内到达该灾害救援点数量成正比,在最大需求救援点内,到达的救援点数量越

多,灾害路段损失越小;

约束条件式(4)保证区域内设置救援点数量为给定的  $p$ ;

约束条件式(6)保证最少有一个救援队到达公路灾害路段,并且考虑灾害路段所能容纳的救援点数量有限及救援点设置数量的经济性;

约束条件式(7)保证应急救援的最短到达时间,增强救援的有效性。

上述模型为三目标的多目标决策模型,多目标准则函数为  $\min[V_1, V_2, V_3]$ 。

多目标决策问题的求解是为得到非劣解(Pareto 解)或满意解。其非劣解生成方法有权重法、约束法、多目标线性规划的单纯形法和动态规划法等<sup>[14]</sup>。为便于公路应急救援决策的实际应用,上述模型求解采用权重法,评价函数形式采用线性加权求和,各目标的权重采用经验法确定,依据决策者的经验和偏好,将原问题转化为单目标混合整数线性规划问题。求解时分别对比单一目标问题解之间的差异以及不同权重组合下多目标问题解之间的异同,来说明子目标之间的矛盾性以及如何结合决策者的经验和主观意愿进行多目标决策。考虑到计算求解的便捷性和有效性,利用 Lingo 软件<sup>[15-16]</sup>编程实现优化目标的求解。

模型求解步骤如下:

(1)利用 Lingo 对每个原始目标求出在可行域

内的极大值  $V_{i\max}$  和极小值  $V_{i\min}$  及其相应的解;

(2)对每个原始目标进行量纲一化处理,得到对应的量纲一化的新目标函数  $V_{i\Delta} = \frac{V_i - V_{i\min}}{V_{i\max} - V_{i\min}}$ ;

(3)结合决策者给出的分目标权重值  $a, b, c$ ,构造线性加权求和评价函数,并利用 Lingo 编程求解转化后的线性加权求和评价函数优化问题的解,所得结果即为多目标优化问题的解。

### 3 应用实例

本研究以浙江桐庐地区的公路网自然灾害应急救援点选址为例,对建立的多目标决策模型的求解作进一步讨论。以该地区的公路网为主要研究对象,包括区域内的高速公路、国道、省道和县道,考察影响公路交通的主要自然灾害包括台风、暴雨、冰雪、大雾及降水引起的滑坡、塌方、泥石流等,对 1986~2009 年的公路自然灾害统计资料进行分析,得到公路灾害路段 16 个,拟从 10 个备选点(现有公路养护站、乡镇街道驻地)中选取 6 个地点设立应急救援点。根据公路局提供的历史灾害和灾害条件下车速数据,通过统计分析得到区域灾害条件下路段实际行驶速度的折减系数如表 2 所示,各应急救援备选点属性、灾害路段属性及度量权重(行程时间)详见表 3~5 和图 3 所示。

表 2 不同气象条件下实际行驶速度折减系数

Tab.2 The travel speed reduction coefficient under different weather conditions

气象条件等级	雾天能见度 V/m	降雨强度/ (mm·h <sup>-1</sup> )	风速等级	降雪强度	积雪厚度 D/cm	车速折减系数
1 级	200<V≤500	10.0~14.9	平均风 5~6 级或阵风 7 级	小雪或雨夹雪	D<1.0	0.95
2 级	100<V≤200	15.0~29.9	平均风 7 级或阵风 8 级	中小雪	1.0<D≤2.9	0.90
3 级	50<V≤100	30.0~49.9	平均风 8 级或阵风 9~10 级	大雪	3.0<D≤4.9	0.86
4 级	V≤50	≥50.0	平均风≥9 级或阵风≥11 级	暴雪	D≥5.0	0.80

注:① 气象种类与等级参照《高速公路交通气象条件等级》(QX/T 111—2010)确定;② 根据路段历史灾害统计情况,取最不利的折减系数;③ 同时发生两种以上灾害时,按最不利等级只进行一次折减。

表 3 备选点属性表

Tab.3 Properties of optional emergency rescue sites

编号	乡镇名称	人口数/人	社会经济总比重	建设成本 C <sub>i</sub> /万元
S <sub>1</sub>	合村乡	5 794	0.04	80
S <sub>2</sub>	百江镇	12 233	0.05	100
S <sub>3</sub>	分水镇	55 049	0.14	110
S <sub>4</sub>	瑶琳镇	27 078	0.09	110
S <sub>5</sub>	钟山乡	14 030	0.05	90
S <sub>6</sub>	莪山畲族乡	7 394	0.04	90
S <sub>7</sub>	横村镇	46 086	0.14	100
S <sub>8</sub>	桐庐县	154 796	0.30	120
S <sub>9</sub>	富春江镇	25 859	0.09	110
S <sub>10</sub>	凤川街道	15 309	0.06	100

利用 Lingo 9.0 软件编制程序,按照前述计算步骤,实现模型求解。在  $p=6$ ,  $T_l=40$  min 的约束条件下,对原始单一目标优化得到的解(表 6)进行对比分析,发现无论是求最小值还是最大值,三目标下的解都各不相同。在本应用实例中,当  $V_1$  达到最小时,  $V_2$  却取到最大值;  $V_3$  达到最小时,  $V_1$  却取最大值。

在原始单一目标函数求解基础上,可以对不同权重下线性加权求和评价函数优化得到满意解(表 7),通过对比分析得到:①虽然不同权重下模型可以给出不同的解  $Y$  和  $X$ ,但是总目标值却非常接近,这说明从整体来看,不同的多目标权重组合彼此有可

表 4 灾害路段属性表

Tab.4 Properties of disaster-affected segments

灾害路段	$K_j/\text{万元}$	$q_j$	$Q_j$	路段权重 $\omega_j$
$F_1$	10	1	2	0.04
$F_2$	12	1	2	0.04
$F_3$	15	1	3	0.09
$F_4$	10	1	2	0.02
$F_5$	13	1	3	0.09
$F_6$	15	1	3	0.12
$F_7$	10	1	2	0.02
$F_8$	11	1	2	0.04
$F_9$	12	1	3	0.06
$F_{10}$	10	1	2	0.04
$F_{11}$	10	1	2	0.02
$F_{12}$	11	1	2	0.02
$F_{13}$	12	1	3	0.06
$F_{14}$	15	1	3	0.08
$F_{15}$	12	1	2	0.04
$F_{16}$	15	1	3	0.12

能达到等价的效果,例如组合 1 与组合 2 的最小解比较接近,这是因为不同路段发生灾害后对救援点个数上下限需求约束的不一致,并体现在分目标函数里面,在最小化过程中该约束的下限会起作用,而上限不起作用;②即使模型有完全相同的解  $Y$  和  $X$ ,但不同的权重组合会导致不一致的总目标,这也反映出权重组合在多目标优化中的重要性,例如组合 2 与组合 3. 出现这种情况是因为整数规划中解空间的不连续性,在优化过程中始终以某个目标下的解为基础,在局部范围内进行调整.

从实例应用过程中可以看出,在选址特征基础上建立的三目标选址优化模型有较好的适应性和有效性. 设计的求解算法简单快速高效,有效降低了用

表 5 应急救援备选点到灾害路段行程时间列表

Tab.5 Travel time between emergency rescue sites and disaster-affected segments

min

编号	乡镇名称	灾害路段															
		$F_1$	$F_2$	$F_3$	$F_4$	$F_5$	$F_6$	$F_7$	$F_8$	$F_9$	$F_{10}$	$F_{11}$	$F_{12}$	$F_{13}$	$F_{14}$	$F_{15}$	$F_{16}$
$S_1$	合村乡	8	12	47	67	74	49	70	98	70	112	108	130	107	106	131	124
$S_2$	百江镇	68	48	31	51	14	11	54	82	54	96	92	114	91	90	115	108
$S_3$	分水镇	46	26	9	29	36	11	32	60	32	74	70	92	69	68	93	86
$S_4$	瑶琳镇	66	46	29	49	56	31	26	62	12	54	50	72	49	48	73	66
$S_5$	钟山乡	110	90	73	93	100	75	70	38	56	10	54	74	51	50	75	68
$S_6$	莪山畲族乡	100	80	63	83	90	65	60	48	46	20	44	66	43	42	67	60
$S_7$	横村镇	86	66	49	69	76	51	46	62	32	34	30	52	29	28	53	46
$S_8$	桐庐县	100	80	63	83	90	65	60	74	46	26	44	38	15	14	39	32
$S_9$	富春江镇	109	89	72	92	99	74	69	83	55	35	53	47	24	23	48	23
$S_{10}$	凤川街道	107	87	70	90	97	72	67	81	53	33	51	45	22	7	32	39

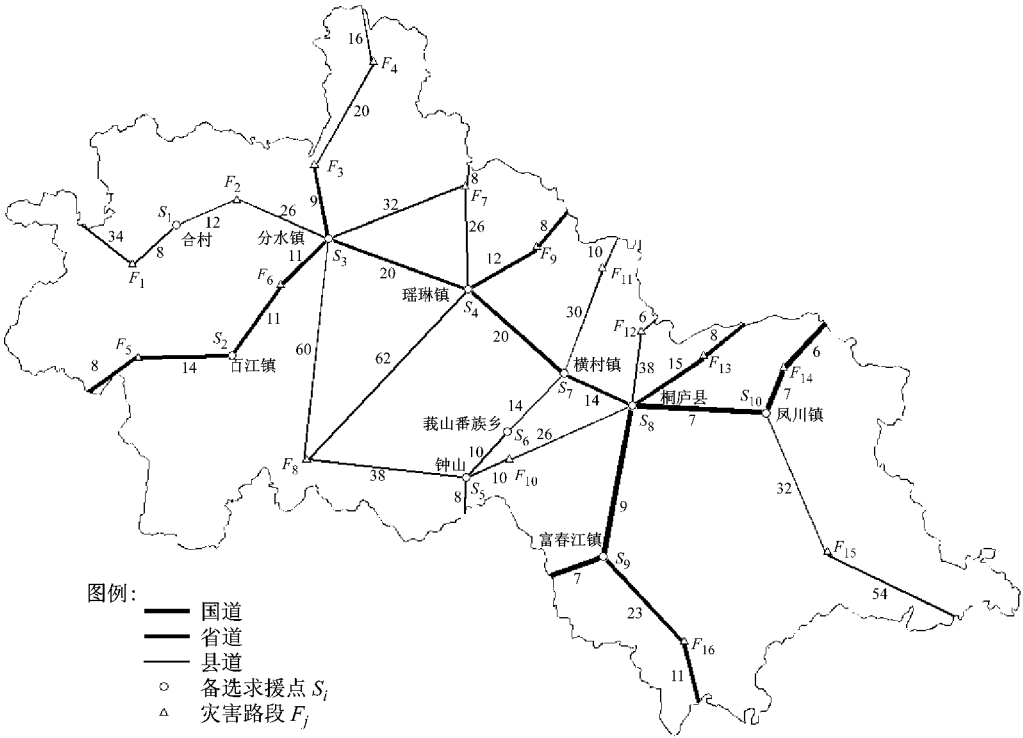


图 3 桐庐公路网自然灾害应急救援点选址拓扑结构图

Fig.3 Topology map of Tonglu Highway emergency rescue sites

表 6 原始单一目标函数求解结果

Tab.6 Results of original single objective function

目标	最小值	最小值的 救援点解 $Y_{\min}$	最大值	最大值的 救援点解 $Y_{\max}$
$V_1$	3.24	(1,0,1,0,1,0, 1,1,1,0)	8.52	(1,0,1,0,1,0, 1,1,0,1)
$V_2$	590	(1,0,1,0,1,1, 1,1,0,0)	610	(1,0,1,0,1,0, 1,1,1,0)
$V_3$	4.55	(1,0,1,0,1,0, 1,1,0,1)	7.35	(1,0,1,1,1,0, 1,1,0,0)

表 7 不同权重下线性加权求和和评价函数优化解

Tab.7 Optimization results of linearity evaluation function with different weights

分目标权重组合	最小值	救援点解 $Y$	救援任务分配 $X$
组合 1 $a=0.1$ $b=0.2$ $c=0.7$	0.218	(1,1,1,0,1,0,1,1,0,0)	(1,1) (1,2) (2,3) (2,6) (3,2) (3,3) (3,4) (3,5) (3,6) (3,7) (3,9) (5,8) (5,10) (7,9) (7,10) (7,11) (7,13) (7,14) (8,12) (8,13) (8,14) (8,15) (8,16)
组合 2 $a=0.30$ $b=0.35$ $c=0.35$	0.219	(1,0,1,0,1,1,1,1,0,0)	(1,1) (1,2) (3,2) (3,3) (3,4) (3,5) (3,6) (3,7) (3,9) (5,8) (5,10) (7,9) (7,10) (7,11) (7,13) (7,14) (8,12) (8,13) (8,14) (8,15) (8,16)
组合 3 $a=0.7$ $b=0.2$ $c=0.1$	0.132	(1,0,1,0,1,1,1,1,0,0)	(1,1) (1,2) (3,2) (3,3) (3,4) (3,5) (3,6) (3,7) (3,9) (5,8) (5,10) (7,9) (7,10) (7,11) (7,13) (7,14) (8,12) (8,13) (8,14) (8,15) (8,16)

## 4 结语

频发的自然灾害对公路交通造成的破坏越来越严重,研究并建立针对自然灾害的区域公路网应急救援点十分必要.本研究在总结回顾国内外应急选址领域研究成果的基础上,对公路自然灾害应急救援点的功能需求和选址影响因素进行了分析,从选址规划的顾客、设施、空间、度量四要素和选址目标等方面对公路应急救援点选址规划特征进行了研究.从公路应急救援的快速反应,集合覆盖要求,灾害损失最小化要求 3 个方面提出了公路网应急救援点的多目标选址优化模型,并探讨了模型的求解算法和求解步骤,通过 Lingo 软件编程实现新优化目标的求解.最后,通过浙江桐庐公路网的应急救援点规划实例,对提出的选址优化模型进行了应用.

针对自然灾害的区域公路网应急救援方面的研究才刚刚开始,应急救援点的选址只是应急工作的基础研究,未来需要对应急资源的配置、调度问题展开更深入的相关研究.

## 参考文献:

- [1] Shier D R, Dearing P M. Optimal locations for a class of nonlinear single-facility location problems on a network [J]. Operations Research, 1983, 31: 292.
- [2] Hakimi S L, Optimal location of switching centers and the

户决策难度.求解过程灵活,允许决策者评估不同目标之间的重要性,事先给出组合权重,还可根据实际条件和救援要求修改相关参数(如布设总救援点数量及服务时间上限等),运行程序就可以得到相应的满意解.最终从求解的结果中可以方便地得到救援点位置以及生成该救援点选址方案下的救援任务分配预案.

absolute centers and medians of a graph [J]. Operations Research, 1964, 12: 450.

- [3] Church R L, Reville C S. The maximal covering location problem [J]. Papers of the Regional Science Association, 1974, 32:101.
- [4] Adenso-Diaz B, Rodriguez F. A simple search heuristic for the MCLP: application to the location of the ambulance bases in a rural region [J]. Omega, 1997, 25: 181.
- [5] Vladimir M, Charles R. The queuing probabilistic location set covering and some extension [J]. Socio-Economic Planning Science, 1994, 28: 167.
- [6] Suleyman T, William A W. The emerging area of emergency management and engineering [J]. IEEE Transaction on Engineering Management, 1998, 45(2):103.
- [7] Masood A B, Mortagy K, Alsayed A C. A multi-objective model for locating fire stations [J]. European Journal of Operational Research, 1998, 110: 243.
- [8] Wlodzimierz O. On the distribution approach to location problems [J]. Computers & Industrial Engineering, 1999, 37: 595.
- [9] Sydney C K C, Chu L. A modeling framework for hospital location and service allocation [J]. International Transactions in Operational Research, 2000, 7: 539.
- [10] 何建敏,刘春林,曹杰,等.应急管理应急系统——选址、调度与算法[M].北京:科学出版社,2005.  
HE Jianmin, LIU Chunlin, CAO Jie, et al. Emergency management and emergency systems: location, dispatch and algorithm [M]. Beijing: Science Press, 2005.
- [11] Haghani A, Hu H, Tian Q. An optimization model for real-time emergency vehicle dispatching and routing [C]//the 82<sup>nd</sup> Annual Meeting of the Transportation Research Board. Washington D C: TRB, 2003:000710.

(下转第 1871 页)